★四川省一级期刊
● 万方数据数字化期刊群入网期刊
●《中国学术期刊（光盘版）》入编期刊
●《中国期刊全文数据库》收录期刊
● 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊
● 北极星 中华期刊网入网期刊
● 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊
● 中国农村电气化信息网
● 重庆维普中文科技期刊数据库
●《超星数字图书馆》入网期刊
●《中国核心期刊（遴选）数据库》收录

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

Vol.33
2010
No.2

ISSN 1003-6954
04>

四川省电机工程学会　四川电力试验研究院

四 川 电 力 技 术
SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊（光盘版）》、《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ—CD规范》执行优秀奖获奖期刊、北极星、中华期刊网入网期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊、中国农村电气化信息网、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊（遴选）数据库》入选期刊

第 2期

2010年 04月 20日

《四川电力技术》编辑委员会名单

主任委员 王 平
副主任委员 张 伟
刘俊勇
委 员
（按姓氏笔画为序）
方文弟 王 卓 白家棣
刘 勇 朱白桦 朱国俊
朱 康 邓亚军 邬小端
李兴源 李建明 严 平
胡 灿 徐 波 唐茂林
韩晓言 谢 舫 甄 威
秘 书 李世平
吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号：
ISSN1003－6954
CN51－1315/TM

2010年第 33卷第 2期（总 206期）
主管单位：四川省电力公司
主办单位：四川省电机工程学会
四川电力试验研究院
发行范围：公开
主 编：胡 灿
副 主 编：吴小冬 谢 舫
编辑出版：《四川电力技术》编辑部
发 行：四川电力试验研究院情报室
地 址：成都市青华路 24号
邮政编码：610072 电话：（028）87082037
传 真：（028）87314278
E-mail：cdscdljs@163.com
印 刷：四川明源印务有限责任公司
封面设计：成都宏泰广告有限公司
国内定价：每册 6.00元
[期刊基本参数] CN51－1315/TM*1978*b*A4*94*zh*P*¥6.00*4300*26*2010－02

目 次

·分析研究·
汽轮发电机组 OPC控制策略的分析及优化 …… 廖 堃 封 颖 李兴源 等（1）
变速恒频双馈风力发电机并网控制策略仿真研究 …… 赵 宇 王 奔 张喜海 等（7）
宝鸡—德阳 HVDC换相失败仿真分析 …… 张 强 欧阳瑞 冯 中（10）
新疆电网 300 MW机组甩负荷的频率特性研究分析 …… 孙开宁 常喜强 杨永利 等（14）
输电线路雷击概率及影响因素研究 …… 李瑞芳 吴广宁 马御堂 等（18）
大规模互联电网区域间低频振荡实用分析方法 …… 姚天亮 杨德洲 徐宏雷（21）
新型串并联混合有源电力滤波器研究 …… 刘 燕 蒋志为 蒋 卫（24）
真空开关操作过电压统计分析研究 …… 张 伟 胡 蓉 杜 颢 等（28）
分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响研究 …… 随新鲜 王 倩 杨亚强 等（31）
城市中压配网典型接线模式研究 …… 都健刚 刘治新（34）
雷电回击模型在雷电电磁场计算中的应用分析 …… 蒋宝忠 滕 欢（38）
基于分布参数模型的混合线路故障测距和重合闸的研究 …… 陈 宾 陈 皓 刘 伟（42）
·电网技术·
新疆电网采取集中切负荷出现的特殊问题的思考 …… 常喜强 张 娟 黄 净 等（45）
增强电网安全的思路 …… 邓明燕（49）
分布式电源的选址及定容 …… 冯 宁 王 倩 马峰超 等（53）
变电站综合自动化改造存在的问题 …… 黄 胜（57）
110 kV变电站接地电阻的降低与核算 …… 李 彬 郑连清（60）
集控型微机五防系统在监控中心的应用探讨 …… 刘人礼（64）
新型绝缘材料在变压器中的应用 …… 于德运（66）
输电线路合闸于故障保护原理综述 …… 钟 超 陈 皓（70）
110 kV电网后备保护灵敏度改善方案 …… 陈晓娟 刘 科 郝文斌（74）
基于 RFID的变电站巡检系统 …… 王 越 麻赛军（77）
基于无线 ZigBee网络技术的用电需求侧全面监测 …… 李 毅（80）
系统反相序二次电流正序接入对微机保护的影响 …… 罗永刚 罗建华 张 凯（83）
铜包钢接地棒及热熔焊接技术在 GIS变电站的应用 …… 曹 海（85）
电力储能技术及其在四川电力系统中的应用前瞻 …… 高希为 滕 欢（89）
简讯：德阳换流站双极站系统调试完成 ……（84）

本期责任编辑 刘坤才 编辑 吴小冬 刘学昌 程文婷

CONTENTS

Analysis on Overspeed Protection Control Strategy of Turbine—generator Unit and Its Optimization ..... Liao Kun Feng Ying Li Xingyuan et al(1)
Simulation Research of Grid Connection Control Scheme for Variable Speed Constant Frequency Doubly—fed Wind—energy Generator ..... Zhao Yu Wang Ben Zhang Xihai et al(7)
Simulation and Analysis of Commutation Failure in Baoji—Deyang HVDC Project ..... Zhang Qiang Ou Yangrui Feng Zhong(10)
Research and Analysis on Frequency Characteristic of Load Rejection of 300 MW Units in Xinjiang Power Grid ..... Sun Kaining Chang Xiqiang Yang Yongli et al(14)
Research on Variation Regularity of Lightning Stroke Probability and Its Influencing Factors..... Li Ruifang Wu Guangning Ma Yutang et al(18)
A Practical Analysis Method of Inter—area Low—frequency Oscillation for Large—scale Interconnected Power Grid ..... Yao Tianliang Yang Dezhou Xu Honglei(21)
Research on Novel Series—parallel Hybrid Active Power Filer..... Liu Yan Jiang Zhiwei Jiang Wei(24)
Statistical Analysis and Research on Switching Overvoltage of Vacuum Switch..... Zhang Wei Hu Rong Du Hao et al(28)
Study on Impact of Distributed Generation on Reliability of Distribution Network ..... Sui Xinxian Wang Qian Yang Yaqiang et al(31)
Study on Typical Connection Modes of Urban Medium—voltage Distribution Network ..... Du Jiangang Liu Zhixin(34)
Analysis and Application of Lightning Return Stroke Model to Calculation of Lightning Electromagnetic Field ..... Jiang Baozhong Teng Huan(38)
Research on Fault Location and Reclosing of Combined Transmission Line Based on Distribution Parameter Model ..... Chen Bin Chen Hao Liu Wei(42)
Thinking of Special Issues Occurring after Concentrated Load Rejection in Xingjiang Power Grid ..... Chang Xiqiang Zhang Juan Huang Jing et al(45)
Thinking for Enhancing the Security of Power Grid..... Deng Mingyan(49)
Selection Scheme for Installation Site and Optimal Capacity of Distributed Generation ..... Feng Ning Wang Qian Ma Fengchao et al(53)
Problems Existing in Integrated Automation Reformation of Substation..... Huang Sheng(57)
Reduction and Check Computation of Grounding Resistance of a 110 kV Substation..... Li Bin Zheng Lianqing(60)
Discussion on Application of Centralized Control Computer—based Five—proof System to Supervisory Control Center ..... Liu Renli(64)
Application of Novel Insulating Materials to Transformer ..... Yu Deyun(66)
Principle Survey of Switching into Fault Protection for Transmission Line ..... Zhong Chao Chen Hao(70)
An Improved Scheme for Sensitivity of Back—up Protection in 110 kV Power Grid ..... Chen Xiaojuan Liu Ke Hao Wenbin(74)
Patrol Inspection System for Substations Based on RFID ..... Wang Yue Ma Saijun(77)
Thorough Monitoring of Demand Side Based on Wireless ZigBee Technology ..... Li Yi(80)
Influence of Secondary Current with Positive Sequence Accessing in Reversed Phase—sequence System on Microcomputer—based Protection ..... Luo Yonggang Luo Jianhua Zhang Kai(83)
Application of Copper Clad Steel Ground Rod and Hot—melt Welding Technology to Guangyuan 110 kV Jiuhua GIS Substation ..... Cao Hai(85)
Overview of Energy Storage Technology and Its Application to Sichuan Power System..... Gao Xiwei Teng Huan(89)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY
2010 Vol.33 No.2
(Ser.No.206)
Bimonthly Started in 1978
Address: No.24 Qinghua Road Chengdu Sichuan China
Postcode: 610072

Sponsor
Sichuan Society of Electrical Engineering
Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power
Editor in chief: Hu Can
Editor& Publisher
Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

汽轮发电机组 OPC控制策略的分析及优化

廖 堃,封 颖,李兴源,徐 娇
(1.成都电业局, 四川 成都 610021; 2.四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:现代化大型机组采用数字电液控制(DEH),普遍具有电超速保护控制系统(OPC),其中一个很重要的方面是防止汽轮机超速。但如果 OPC的控制策略不当,不仅起不到应有的超速保护作用,而且造成汽门频繁启闭,产生"乒乓"现象。通过对 OPC振荡机理的分析,发现在电网侧发生扰动时,OPC的控制参数不合理及与其他保护措施不配合是引起系统振荡的根本原因。对 OPC的动作时限及阀门开度提出相应的修改,针对 2006年 7月 7日贵阳南部电网事故,根据实际系统,用 NETOMAC程序建立了原动机、调速器和汽轮发电机过速保护的详细模型,根据理论分析的结果提出了 3种 OPC的动作方案并仿真证明了分析结果的正确性。最后提出相应的改进建议。

关键词:超速保护(OPC);动作时限;阀门开度;调速器;频率稳定

Abstract: Modern large-scale unit adopts digital electro-hydraulic (DEH) control which generally has overspeed protection control (OPC), and one of its main functions is to prevent steam turbine overspeeding. But if the control strategy of OPC is not appropriate, it will not only fail to execute the overspeed protection, but also cause the valves to open and close frequently, resulting in "ping-pong" phenomenon. Through the analysis of OPC oscillation mechanism, the basic reason which causes system oscillation is the unreasonable control parameters of OPC which is incoordinated with other protective measures. Some modifications are proposed for OPC action time limit and valve opening. For the accident on 7th July, 2006 in Guiyang Southern Grid, the detailed overspeed protection models of prime mover, speed governing device and turbo-generator are established by using NETOMAC based on the real network data, the testing data of the field measurements, and the supplement data of classic values. According to the theoretical analysis of the results, three kinds of OPC action schemes are put forward and the simulation proves the correctness of the theoretical analysis. At last, the suggestions for improvement are presented.

Key words: overspeed protection control (OPC); action time limit; valve opening; speed governing system; frequency stability

中图分类号:TK323 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0001-06

0 引 言

超速保护器(overspeed protection controller, OPC)是数字式电气液压(digital electric hydraulic, DEH)调节系统的重要组成部分。保证热动系统(汽轮机及调速系统)处于安全稳定的运行状态是机组超速保护的目标。当 OPC的转速是额定转速的 103%时,通过快速关闭调节汽阀可实现对机组的超速保护[1]。在单一故障模式下,通常根据 OPC所在电网的情况灵活整定 OPC的动作特性[2],但 OPC控制策略的正确性需要在实际电网事故中进行校验[3]。发电机组并网运行时,如果 OPC控制策略选择不当,不仅无法实现超速保护,而且会使汽门频繁开关,产生"乒乓"现象,给机组轴系和热力系统造成频繁冲击,严重影响机组安全,甚至可能使电网大规模地甩负荷,发生频率振荡或频率失稳事故,最终造成整个电网崩溃。

OPC动作后恢复带负荷的时间较长,也是造成电厂汽轮机快速解列及电网不稳定的较大因素之一。因此,缩短 OPC动作时间、快速开启汽轮机调门、接带负荷成为处理该类事件的要点。同时 OPC动作延时点与退出点对抑制振荡、迅速恢复功率、防止事故扩大与正确保护汽轮机有重要意义。因此需要对 OPC的特性及设置进行深入研究。事故现象还表明单纯依靠某一种频率控制手段往往不能将频率稳定。即便是在多种频率控制手段配合下,也可能会出现配合不当恶化频率稳定问题。

迟缓率对汽轮机运行是十分不利的,因为迟缓率

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01);国家自然科学基金项目(50877050)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

越大,说明从汽轮机转速变化到调节汽门动作的时间间隔越大,造成汽轮机不能及时适应外界负荷变动的不良现象[4]。特别是机组甩负荷时,迟缓率造成的调节汽门关闭滞后,将使转速升高过多,从而引起危急保安器动作。而速度变动率越大,动态超速也越大。迟缓率与速度变动率的共同影响,就在较大范围内破坏了功率与转速的单值对应关系。那么在 OPC的动作时限中就应该考虑迟缓率与速度变动率的影响。

文献[5]针对云南电网火电机组频率异常情况下的运行要求,制定了第三级控制措施,即机网协调配合:并网闭锁 OPC,机组解列后开放 OPC功能。文献[6]针对昆明发电厂“2.24”事故的发生,提出了 6条建议,其中包括 OPC动作值的整定、动作时限的确定以及控制逻辑的优化。文献[7]论述国内外几种典型机组实现数字电液控制 OPC的基本原理及其技术特色。文献[8]和文献[9]提出在转速回路增加功率不平衡的补偿,可使 OPC不仅具备汽门快关的功能,且在不同负荷下对甩负荷工况的适应性良好。文献[10]提出了发电机高频切机与汽轮机 OPC协调配合的保护方案,给出了防止地区及大型送端电网解列后高频运行的 3层次安全稳定控制措施。

从 OPC动作的基本逻辑及其动作延时点、退出点出发,分析了 OPC引起系统振荡的原因并修改 OPC的动作特性,得到动作时限及阀门开度的表达式。以 2005年南方电网的实测数据为基础,根据 2006年 7月 7日贵阳南部电网事故,运用 NETOMAC建立原动机、调速器和 OPC的模型,对提出的 3种修改方案进行仿真,论证了理论分析的合理性,并提出了相应的改进建议。

1 OPC振荡机理分析

1.1 OPC模型

DEH的保护系统 OPC功能设定为转速达到 103% n_0 时快关中压调节汽阀;在 103% n_0 < n < 110% n_0 时,超速控制系统通过 OPC电磁阀快关高、中压调节汽阀,实现对机组的超速保护。

OPC的基本动作描述如下。

通过逻辑电路控制调速和 OPC动作的选择,即当指令条件不满足,OPC不动作时控制通路保持调速器调节,由调速器的调频环节进行跟踪调节;当指令条件达到,屏蔽调速器,控制通路转到 OPC逻辑,完全由 OPC进行控制阀门。OPC的动作逻辑简单类似于一个由转速整定的二值电平控制模型,即转速升至 3 090 r/min 由执行机构动作,汽门全关;转速降至 3 000 r/min 由执行机构动作,阀门全开。

OPC的简单动作特性如图 1所示。可知 OPC实现的是典型的开环控制快关快开规律。

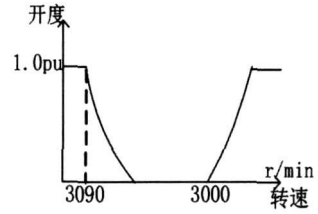

图 1 OPC简单动作特性图

1.2 OPC振荡机理分析

OPC的动作特性说明:高频 51.5 Hz (对应机组转速为 3 090 r/min)产生后,汽轮机阀门全由 OPC控制。如果发电机组不切机,根据 OPC的动作特性,此时情况类似于汽轮机的快关控制。如图 2所示,表明了频率在 OPC作用下的变化过程。机组转速达到 3 090 r/min时经 t_0～t_1 时间,调节阀门全关,原动机的出力骤减至零,机组的过剩能量被 OPC迅速减小,而不至于使机组处于危险的境地。

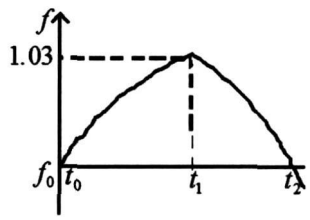

图 2 OPC动作下的频率动态

设机组稳态出力 P_g,负荷 P_{load}, $P_g = P_{load}$。在 t_0 时刻,负荷突减$\triangle P_{load}$,机组功率过剩,若一调频调减出力不足,一次调频最大减少出力$\triangle P_r < \triangle P_{load}$,此时机组实发功率为 $P_{g1} = P_g - \triangle P_r$,剩余负荷为 $P_{load1} = P_{load} - \triangle P_{load}$, t_0～t_1 时间内机组过剩功率为

$$\triangle P_{o1} = P_{g1} - P_{load1} = \triangle P_{load} - \triangle P_r \quad (1)$$

机组以过剩功率加速,OPC动作后,机组实发功率为 $P_{g2} = 0$,剩余负荷为 $P_{load2} = P_{load1} = P_{load} - \triangle P_{load}$, t_1～t_2 时间内机组过剩功率为

$$\triangle P_{o2} = P_{g2} - P_{load2} = -(P_{load} - \triangle P_{load}) \quad (2)$$

因此,机组以过剩功率 $-\triangle P_{o2}$为阻尼进行减速。同时,一次调频的动态调节不再起作用,OPC信号全占阀门控制。当转速降至 3 000 r/min时,OPC全开

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阀门,机组实发功率为$\triangle P_{g3}=P_{g1}=P_g-\triangle P_r$,剩余负荷为 $P_{load3}=P_{load2}=P_{load}-\triangle P_{load}$, $t_2\sim t_3$时间内系统过剩功率为

$$\triangle P_{o3}=P_{g3}-P_{load3}=\triangle P_{load}-\triangle P_r \quad (3)$$

忽略机组其他阻尼的情况下,由转子运动方程(标幺值表示)

$$J\frac{d\triangle\omega}{dt}=P_m-P_e \quad (4)$$

对转子进行积分计算可得

$$t=\int_{\omega_1}^{\omega_2}\frac{J}{P_m-P_e}d\omega \quad (5)$$

P_m-P_e即为机组过剩功率。分别将式(1)、(2)、(3)代入式(5),可得第一次加速时间为

$$t_1=\int_{1.0}^{1.03}\frac{J}{\triangle P_{load}-\triangle P_r}d\omega \quad (6)$$

第二次“加速”(实际是减速)时间为

$$t_2-t_1=\int_{1.03}^{1.0}\frac{J}{-(P_{load}-\triangle P_{load})}d\omega \quad (7)$$

线性化处理可以认为

$$(\triangle P_{load}-\triangle P_r)(t_1+t_3-t_2)=(P_{load}-\triangle P_{load})(t_2-t_1) \quad (8)$$

计算得到

$$t_3=(P_{load}-\triangle P_r)(t_2-t_1)/(\triangle P_{load}-\triangle P_r) \quad (9)$$

由此可以计算得到 t_3时刻对应的频率为

$$f_{low}=\omega_{low}=1.0-[(P_{load}-\triangle P_{load})t_2-(P_{load}-\triangle P_r)t_1]/J \quad (10)$$

当机组为实际特定汽轮机组时,J是已知的,在OPC按照在 3 090 r/min全关,3 000 r/min全开阀门整定时,通过式(10)即可计算得到汽轮机频率振荡的最低值。该值如果过低,将引起低频减载装置启动,以促使机组频率加速回升,如果电网其他机组调频不力,频率将会更快地升至高频,机组再次在 OPC控制下振荡,如此恶性循环,造成严重事故。

1.3 OPC动作特性的修改

根据 OPC的实际动作特性,如果在系统频率上升阶段和下降阶段分别采用不同的控制策略,可避免汽门的频繁启闭和“乒乓”现象。OPC动作后,强占机组控制权,但最终转速稳定控制仍由调速系统完成。

OPC动作后阀门关闭及开启的多少与振荡现象也有密切关系。从文献[15]中描述的汽轮机调节系统模型来看修改阀门的开度值可以从 OPC本身的控制策略改进,也可以在 OPC实施简单快关快开控制策略的同时,对高压调节门和中压调节门实施不同的控制方法,调整其开度。

对不同机组,OPC的复位时间有所不同。应该根据系统和机组情况,确定恰当的 OPC的复位时间。否则,由于实际转速与给定转速之差引起二次转速飞升,其危害甚至超过一次转速飞升。

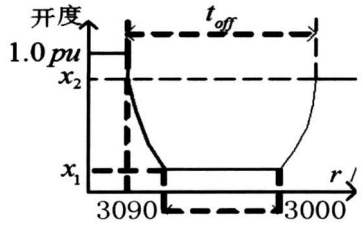

图 3 修改后的 OPC动作特性图

如图 1所示 OPC的动作是一个数字控制器,其动作逻辑是可以修改和整定的,如图 3,修改后的OPC动作特性中可以人为调整的参数有:①上升阶段和下降阶段采取的控制策略;②汽门最小开度 X_1;③汽门最终开度 X_2;④汽门关闭时间 t_{no}。

1.3.1 OPC动作时限的确定

如果暂不考虑发电机组、一次调频、负荷等因素产生的功率调节效应,在 OPC动作时系统过剩功率以$\triangle P$,则若$\triangle P_{off}\leqslant\triangle P$,OPC不足以抑制过剩功率,即频率超升;若$\triangle P_{off}>\triangle P$,OPC可以抑制过剩功率,频率会下降至正常之下。根据各台机组调速系统的速度变动率、迟缓率确定 OPC的动作时限。

$$\triangle P_{off}=(1-x_1)\frac{t_{off}+t_{no}}{2}+k(1-x_2)$$

$$\geqslant\triangle P=\triangle P_{load}-\frac{\varepsilon}{\delta}P_H$$

ε为迟缓率,δ为转速不等率。k为阀门度与有功出力的折算系数。

为简便起见,首先固定汽门的最小开度为 0,最终开度为 1,可得到

$$\triangle P_{off}=1.0\times\frac{t_{off}+t_{no}}{2}\geqslant\triangle P=\triangle P_{load}-\frac{\varepsilon}{\delta}P_H$$

通常 OPC的延时动作时间 t_H及开启时间 t_0都已在频率上升和下降阶段的控制策略中给定,则 $t_{off}=t_0+t_H+t_{no}$。

$$\triangle P_{off}=1.0\times\frac{t_0+t_H+t_{no}+t_{no}}{2}$$

$$\geqslant\triangle P=\triangle P_{load}-\frac{\varepsilon}{\delta}P_H$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

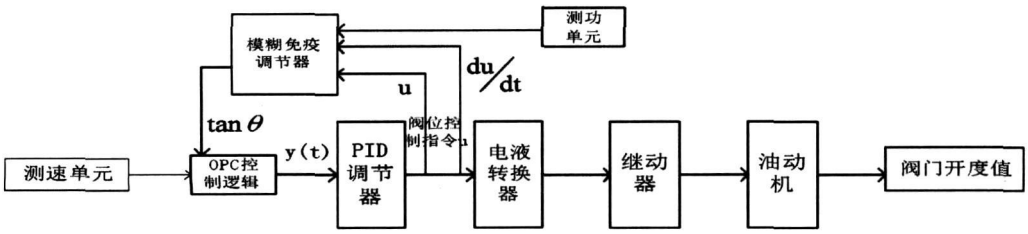

图 4 OPC的控制流程

可解出

$$t_{no} \geqslant \frac{2(\triangle P_{load} - \frac{\varepsilon}{\delta} P_H) - t_b - t_d}{2}$$

有关文献表明，OPC动作维持时间过长和过短都不合适，要求不小于油动机的关闭时间。一般要求复位时间在 (1±0.5) s即可[12]。

1.3.2 输出调节门开度基准

在本设计的 OPC对阀门的控制中，同时计及转速变化和功率变化的影响，从而形成一个闭环控制。从 OPC的动作特性可以看出，在频率上升和下降阶段的曲线中，在每个频率点附近线性化，在数学表达式上可以线性化认为是爬坡函数，那么在爬坡函数中将频率的变化作为其自变量，函数的斜率利用模糊免疫控制算法[13,14,15]加入功率变化的因素。PID控制参数能灵活地加以整定，对频率偏差信号进行适应性的调节、校正。利用 DEH的转速闭环控制功能[16]，采用 PID调节器，既可克服中间再热蒸汽的容积效应引起的影响，又有利于保证必要的静特性。

免疫反馈原理得出的反馈控制规律为

$$u(k) = K(1-\eta f(u(k), \triangle u(k)))\varepsilon(k) = k_{pl}\varepsilon(k)$$

式中，$k_{pl} = K(1-\eta f(u(k), \triangle u(k)))$; $K = k_1$; K为控制反应速度; $\eta = \frac{k_2}{k_1}$, η为控制稳定效果; f(□)为一选定的非线性函数，利用模糊控制器可逼近非线性函数 f(□)。采用上述模糊免疫控制原理对爬坡函数中的斜率进行调节，使其具有自适应的功能。

令 ε(k) = △P，采用模糊免疫 PID控制中的比例增益控制，避免由积分及微分环节对输入信号引入的相位偏差。斜率 tanθ定义为

$$K_{id} = K(1-\eta f(u(k), \triangle u(k)))$$

其中，K = 20为固定比例系数; η为控制稳定效果调整系数，这里设置为 1; f(u(k), △u(k))为一非线形函数，采用 4条模糊控制规则逼近。

(1) If U(k) is P and △U(k) is P then f(□) is N;

(2) If U(k) is P and △U(k) is N then f(□) is Z;

(3) If U(k) is N and △U(k) is P then f(□) is Z;

(4) If U(k) is N and △U(k) is N then f(□) is P。

在各条模糊控制规则中，采用常用的 max－min推理机对上述规则进行推理，再采用最大隶属度法设计系统的解模糊器。得到确定的输出量 f(□)，代入前式即可求出斜率值。

输出的函数值 y(t)作为转速 PID的输入，PID控制器计算出油动机的行程，经过电液转换器转换，控制汽门开度发生改变，使汽轮机实际转速逐渐与给定值相等，消除转速偏差，达到控制机组频率的目的。根据功频调速器模型[17]可得 OPC的控制流程，如图 4所示。

2 仿真结果及分析

利用 2006年 7月 7日贵阳南部电网故障及发生的 OPC的动作过程，用 NETOMAC程序建立原动机、调速器和 OPC的详细模型。

根据文献 [18]、[19]对故障的描述，清镇电厂 7号机组 OPC动作特性不恰当是引起系统持续振荡的直接原因。因此修改清镇电厂 7、8号机组 OPC的控制策略，并根据 1.3节对 OPC特性作出的修改，设置 OPC动作特性的方案如下。

方案 1(见图 5)：修改清镇电厂 7号机组和 8号机组 OPC动作特性。当机组转速为 3 090 r/min时，延时 3 s后 OPC控制阀门全部关闭；当机组转速为 3 000 r/min时，不延时 OPC控制阀门全部打开。并按照式 (12)修改 OPC动作时限。

方案 2(见图 6)：将 OPC回路与伺服执行机构相

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结合可实现复杂的快关控制规律,可克服简单快关控制存在的适应性差造成的过制动或制动不足的缺陷,而且增加后摆阻尼。采用与方案 1相同的 OPC控制策略,对中压调节门采用开关控制的同时,对高压门采用线性最优控制以增加快关后转子后摆的阻尼[20],使振荡尽快衰减。

方案 3(见图 7):采用与方案 1相同的 OPC控制策略,并在调节系统回路上加入 1.3.2节分析的阀门控制逻辑。

采用方案 1所得到的仿真结果可知,OPC的上升阶段和下降阶段所采用的控制策略与 OPC的动作时限相结合可以缩短系统的振荡时间。

采用方案 2所得到的仿真结果可知,得到的系统最低频率高于方案 1得到的最低频率,因此不会出现过多系统切负荷的情况。系统振荡次数减少。

采用方案 3所得到的仿真结果可知,得到的系统最低频率高于方案 2和方案 1得到的系统最低频率,不会出现系统切机、切负荷等情况,可以迅速稳定系统频率,较好地抑制系统振荡。

方案 2与方案 3中,OPC的动作次数明显低于方案 1。

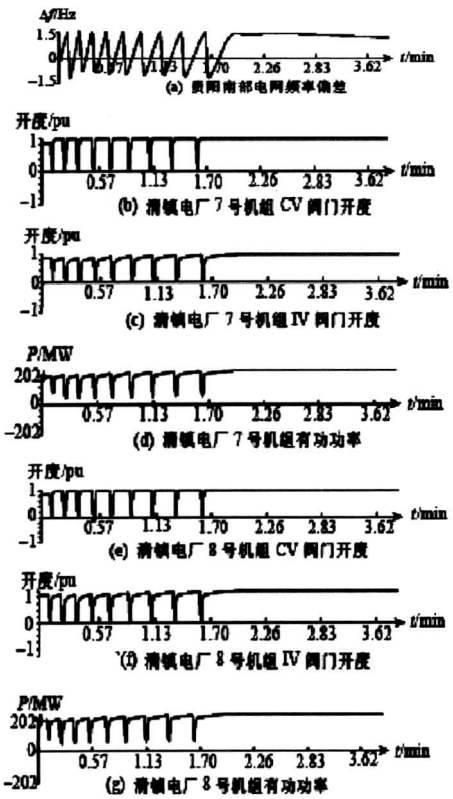

图 5 方案 1动作特性仿真图

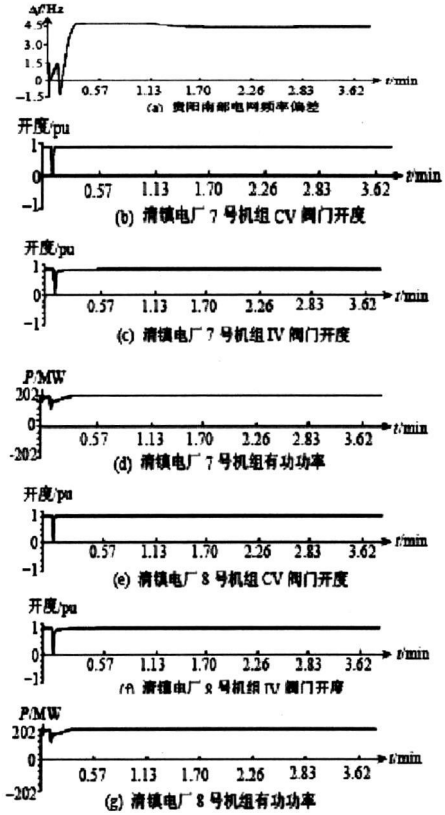

图 6 方案 2动作特性仿真图

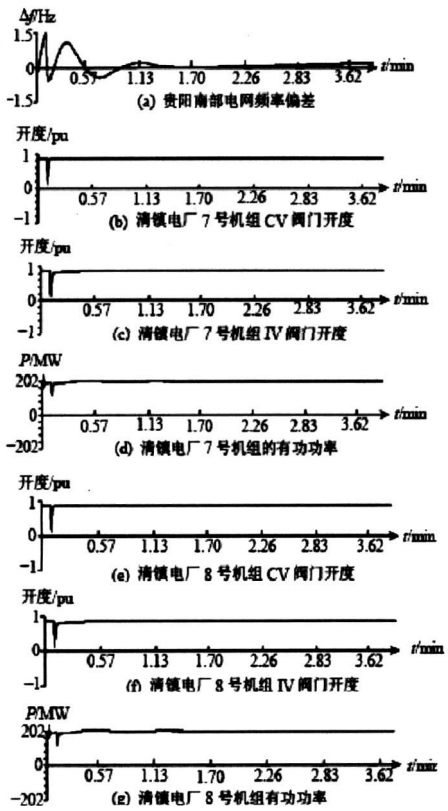

图 7 方案 3动作特性仿真图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 改进建议

(1) 将 OPC与其他频率稳定措施配合,如一次调频、高频切机、低周减载、DEH的自动调频功能。防止 OPC动作引起的频率最低值达到低周减载的动作值,引起低周减载动作,从而使频率上升更快,再次引起 OPC的动作。可以适当增大一次调频的死区和一次调频限制幅度,从而减少 OPC的动作次数。高频切机的动作值与 OPC相互配合,可以减少系统的振荡次数。将 OPC的动作特性与 DEH的自动调频功能相结合考虑,就可以重新整定 OPC的动作值。

(2) 智能电网的一个重要特征就是其自愈功能。OPC动作一个重要的因素就是系统与大电网解列之后形成孤网引起的,因此减少 OPC动作次数一个有效的方法就是在系统解列之后尽可能快地重新并网运行,从而将 OPC闭锁,减少系统振荡次数。

(3) 在实际系统中,速度变动率和迟缓率的大小与系统运行条件和测量手段有关。因此在做甩负荷实验时,可解除 103%动作回路,保持油开关跳闸 OPC动作回路,就可以完整获取调节系统的速度变动率[21]。迟缓率的大小,与机组传动机构及配汽机构的磨损以及调节部件的卡涩有关。应注意对这些部件的维修与调节。在确定 OPC动作时限的同时,也应考虑与机组的运行方式协调。

(4) 根据仿真结果, OPC采取简单快关快开控制策略时,对高压调节门和中压调节门采取不同的控制方法,同样可以减少 OPC的振荡次数。

4 结 论

火电机组的 OPC保护功能不能只考虑保机组设备安全,同时还要考虑电网安全,应将两者结合统一考虑。通过对 OPC引起振荡的机理分析,动作特性的修改以及设置的方案仿真分析,得到如下结论。

(1) OPC振荡的原因在于其控制参数的不合理,并且与一次调频、高频切机、低周减载等保护措施的配合有密切关系。

(2) 针对 OPC振荡机理的分析,得出动作时间的数学表达式;通过 OPC的动作特性图分析得到阀门开度的表达式及其动作流程。

(3) 根据对 OPC动作特性的修改提出了 3种修改方案,仿真结果发现这 3种方案均可以稳定系统频率,较好地抑制系统振荡,验证了理论分析的正确性。提出了 OPC控制参数与其他频率稳定措施动作值相配合,智能电网与机组协调,增加功率控制信号等 5个改进措施。

参考文献

[1] 肖增弘,徐丰.汽轮机数字式电液调节系统 [M].北京:中国电力出版社, 2003.

[2] 宋铭.纳雍发电总厂 4号 300 MW 机组 OPC功能改造 [J].贵州电力技术, 2005, (11): 1-3.

[3] 蔡运清,汪磊, KipMorison, 等.广域保护 (稳控)技术的现状及展望 [J].电网技术, 2004, 28(8): 20-25.

[4] 刘全社.汽轮机调速系统速度变动率和迟缓率的探讨 [J].汽轮机技术, 2001, 43(4): 244-245.

[5] 吴琛,李文云,杨强,等.云南电网高频率问题与火电机组 OPC功能协调配合研究 [J].云南电力技术, 2005, 12(33): 1-3.

[6] 李飚.火电机组 OPC超速保护动作特性分析 [J].电力安全技术, 2005, 12(7): 21-22.

[7] 田丰,张俊杰.大型机组电超速保护装置综述 [J].国际电力, 2001, (4): 13-18.

[8] 梁京英.珠海电厂 700MW 机组 OPC系统特性分析 [J].电力系统装备, 2003, (11): 83-84.

[9] 田丰,余天龙,欧坚,等.珠海电厂 700 MW 机组超速限制系统特性分析 [J].热力发电, 2001(3): 46-48.

[10] 孙华东,王雪东,马世英,等.贵州主网及其地区电网孤网运行的安全稳定控制 [J].电网技术, 2008, 32(17): 35-39.

[11] 张利平.汽轮机调节系统工作不稳定原因分析 [J].内蒙古科技与经济, 2006(11): 54.

[12] 张镇一,朱程滨.电超速保护装置的分析与评价 [J].汽轮机技术, 1995, 37(6): 321-326.

[13] 江中央,蔡自兴,龚涛.一种改进的模糊免疫反馈 PID控制器 [J].控制工程, 2008, 15(5): 485-488.

[14] 吕岗.免疫算法及其应用研究 [D].中国矿业大学.

[15] 郑恩让,回立川.免疫优化模糊控制及其应用 [J].控制工程, 2006, 13(5): 460-462.

[16] 史建良,王新宇,李国宝,等.国产 200 MW 机组甩负荷试验与分析 [J].中国电力, 2003, 36(11): 53-56.

[17] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析 [M].北京:清华大学出版社, 2002.

[18] 黄宗君,李兴源,晁剑,等.贵阳南部电网 7-7事故的仿真反演和分析 [J].电力系统自动化, 2007, 31(9):

(下转第 69页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5 H级 NOMEX纸绝缘浸漆式干式变压器主要耗材用量及成本

容量		铁心硅钢片重量 /kg	高低绕组铜线重量 /kg	NOMEX纸占铜线重量 /%	NOMEX纸占铜线重量 /kg	NOMEX纸总成本 /元 (按 450元 /kg计算)
1 000	30Z130	1 727	高压 340	1.26	4.3	1 935
			低压 320	1.22	3.9	1 755
1 250		1 894.4	高压 410	1.35	5.5	2 475
			低压 430	1.02	4.4	1 980

树脂浇注式干式变压器生产设备不同的是有真空压力浸漆设备，没有环氧树脂真空浇注设备。由于环氧树脂真空浇注设备的价格比真空压力浸漆设备价格要高出 2倍多，且线圈绕组在用环氧树脂浇注时必须使用不锈钢浇注模具，每套模具价格约在 2～3万元，批量系列生产需用几十套不锈钢模具，总价格近百万元。而真空压力浸漆需用的工装既简单又通用，一套工装设备就能满足不同容量级纸绝缘浸漆式干式变压器的批量生产需要，所以在一般情况下，H级 NOMEX纸绝缘浸漆式干式变压器的生产成本要比环氧树脂浇注式干式变压器的生产成本低大约 5%左右。

4 结 论

2009年国网公司提出建设统一坚强智能电网，智能电网的目标是实现电网运行的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全。开关和变压器是数量最多、应用面最广的重要电力设备，在实现灵活可控的同时，智能电网对设备安全、经济会有更高的要求[12]。

以上介绍了 3种新型绝缘材料：硅油、高燃点 β油、NOMEX绝缘纸。硅油变压器多用于易燃、易爆及对安全要求高的场所，硅油变压器中的硅油价格比变压器油贵，但是其综合技术性能在变压器市场有其特有的优势。β油可完全生物降解，无毒性，对人体和环境无危害，可循环利用，而且与变压器中其它材料具有相容性，与常规油可以混合使用。β油变压器材料成本高出普通油变压器 25%左右，而比浇注干式变压器材料成本低 40%左右，经济效益很明显。NOMEX绝缘纸耐热特性明显优于环氧树脂绝缘材料，若将其应用于变压器中，一般情况下，变压器的生产成本要比环氧树脂浇注式干式变压器的生产成本低大约 5%左右。

参考文献

[1] 侯盈，马郁聪，鱼震民. 浅谈国内干式变压器的几个问题 [J]. 变压器，2005, 42(12)：15－18.

[2] 侯盈，鱼震民. 对降低高燃点油变压器成本及其功能延伸的几点思路 [J]. 变压器，2007, 44(7)：5－6.

[3] 韩进贤，孙挚. 硅油与矿物油用作变压器油的性能比较 [J]. 有机硅材料，2000, 14(5)：18－19.

[4] 邹武. 环保变压器油——硅油 [J]. 电气制造，2008 (12)：64－65.

[5] 侯盈，鱼振民，彭国平. 浅谈 Beta Fluid高燃点油浸变压器 [J]. 变压器，2003, 40(8)：16－19.

[6] 衣家文. 高燃点变压器油 [J]. 变压器，2005, 42(11)：13－15

[7] 郭宏山，周晓凡. 高燃点绝缘油变压器的应用 [J]. 变压器，2005, 42(11)：10－12.

[8] 柳泽荣，丁在兴，翟岩，等. 油色谱分析在变压器故障诊断中的应用 [J]. 变压器，2005, 42(9)：43－46.

[9] 桑会凯. H级 NOMEX纸绝缘干式变压器 [J]. 变压器，2003, 40(8)：13－16.

[10] 龚家珑. 环氧树脂浇注式和 NOMEX纸绝缘浸漆式干式变压器技术 [J]. 华中电力，2003 (6)：54－56.

[11] Sundovist K. 变压器中气体的产生 [J]. 环烷，2002 (1)：10－11.

[12] 谢开，刘永奇，朱治中，等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力，2008, 41(6)：19－22.

(收稿日期：2009－12－27)

(上接第 6页)

95－100.

[19] 黄宗君，晁剑，李兴源，等. 贵阳南部电网高频问题与超速保护器仿真研究 [J]. 电网技术，2007, 31(15)：26－32

[20] 于达仁，杨永滨，毛志伟，等. 复杂快关控制规律在 DEH系统中的实现 [J]. 汽轮机技术，1997, 39(3)：157－160.

[21] 田丰，余天龙. 大型机组甩负荷试验若干问题探讨 [J]. 电力建设，2009(9)：48－51.

作者简介：

廖 堃 (1979－)，男，从事地区电网电力调度工作。

封 颖 (1982－)，女，从事地区电网电力调度工作。

李兴源 (1945－)，男，教授，博士生导师，IEEE高级会员，中国电机工程学会理事，研究方向为电力系统分析，稳定和控制等。

徐 娇 (1983－)，女，从事地区电网电力调度工作。

(收稿日期：2009－10－10)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变速恒频双馈风力发电机并网控制策略仿真研究

赵 宇,王 奔,张喜海,李 慧
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:根据变速恒频双馈风力发电机组的运行特点,将矢量变换控制技术应用于发电机并网控制。利用 Matlab软件建立空载并网仿真模型,对并网前的空载运行、并网时的过渡过程进行了仿真研究。仿真结果表明,所采用的空载并网技术是变速恒频双馈风力发电机的一种较理想并网方式。

关键词:交流励磁;双馈风力发电机;矢量控制;并网

Abstract: According to the operation performance of variable speed constant frequency (VSCF) doubly-fed wind-energy generator set, vector control technique is presented to be used for grid connection control of generator. Using the Matlab software, a no-load grid-connected simulation model is established and applied to make a comprehensive system simulation on the no-load operation before the connection with the grid and the transient process at the connection moment. Both simulation and experiment studies prove that the proposed no-load grid-connected scheme is a relatively ideal approach for VSCF doubly-fed wind-energy generator.

Key words: A.C. excitation; doubly-fed wind-energy generator; vector control; grid connection

中图分类号:TM 315 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0007-03

随着中国风力发电技术的迅速发展,国内建设了一批大规模的并网风力发电工程,对于大功率风力发电机组的需求越来越大。但是随着风力发电机组功率的增加,并入电网时产生的冲击电流也随之增大,严重时可能会导致风力发电系统无法接入电网,这给电力系统的安全运行带来了隐患。目前大型风力发电机组、双馈感应式变速恒频风力发电机组得到的应用最广,实现变速恒频双馈风力发电机组无冲击电流并网技术越来越重要。

变速恒频双馈风力发电机采用双馈型异步发电机,与传统的直流励磁同步发电机以及通常的异步发电机相比,其并网过程有所不同。变速恒频双馈风力发电机采用交流励磁,可根据电网电压和发电机转速来调节转子励磁电流,以此来调节发电机输出电压以满足并网条件[2],可实现在变速的条件下进行并网。

采用矢量控制技术来设计风力发电机组的并网控制策略,利用 Matlab软件建立空载并网仿真模型,研究了变速恒频双馈风力发电机的空载并网过程。

1 变速恒频双馈风力发电机并网控制策略

1.1 风力发电机空载并网原理

交流发电机并网条件是发电机输出电压和电网电压在幅值、频率以及相位上完全相同。因而并网前应对发电机的输出电压进行调节,当满足并网条件时进行并网操作,并网成功后从并网控制切换到发电控制。并网前发电机空载,取电网电压(频率、相位、幅值)作为控制信息提供给控制系统,据此调节发电机的励磁,按并网条件控制发电机定子空载电压。

为了实现交流励磁发电机并网前的端电压准确调节和并网后的输出有功、无功功率的解耦控制,必须实施发电机磁场定向的矢量控制。

为此,首先需要建立磁场定向 m-t旋转坐标系内发电机的数学模型。

1.2 双馈发电机(DFIG)的数学模型

定子侧电压、电流正方向按照发电机惯例,转子侧电压、电流正方向按照电动机惯例,可写出双馈发电机在定子同步速 m-t两相坐标系下的数学模型[3]。

定转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{m1} = -r_1 i_{m1} - p\psi_{m1} + \omega_1 \psi_{t1} \\ u_{t1} = -r_1 i_{t1} - p\psi_{t1} - \omega_1 \psi_{m1} \\ u_{m2} = r_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - (\omega_1 - \omega_2)\psi_{t2} \\ u_{t2} = r_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + (\omega_1 - \omega_2)\psi_{m2} \end{cases} \quad (1)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{m1} = l_1 i_{m1} - l_m i_{m2} \\ \psi_{t1} = l_1 i_{t1} - l_m i_{t2} \\ \psi_{m2} = -l_m i_{m1} + l_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = -l_m i_{t1} + l_2 i_{t2} \end{cases} \tag{2}$$

电磁转矩、运动方程为

$$\begin{cases} T_e = \dfrac{3}{2} n_p l_m (i_{m1} i_{t2} - i_{t1} i_{m2}) \\ T_1 - T_e = \dfrac{J}{n_p} \dfrac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \tag{3}$$

式中，r_1、r_2分别为定转子绕组等效电阻；l_1、l_2、l_m分别为 m－t轴定转子绕组自感及互感；i_{m1}、i_{t1}、i_{m2}、i_{t2}、u_{m1}、u_{t1}、u_{m2}、u_{t2}分别为 m－t轴定转子电流与电压；ψ_{m1}、ψ_{t1}、ψ_{m2}、ψ_{t2}分别为 m－t轴定转子磁链；ω_1为定子同步电角速度；ω_2为转子电角速度；$\omega_s = \omega_1 - \omega_2$为转差角速度；p为微分算子；J为转动惯量；$n_p$为电机极对数；$T_e$、$T_1$分别为电磁转矩和机械转矩。

将式 (2)代入式 (1)整理得

$$\begin{cases} u_{m1} = (-r_1 - l_1 p) i_{m1} + \omega_1 l_1 i_{t1} + l_m p i_{m2} - \omega_1 l_m i_{t2} \\ u_{t1} = -\omega_1 l_1 i_{m1} - (r_1 + l_1 p) i_{t1} + \omega_1 l_m i_{m2} + l_m p i_{t2} \\ u_{m2} = -l_m p i_{m1} + \omega_s l_m i_{t1} + (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{t2} \\ u_{t2} = -\omega_s l_m i_{m1} - l_m p i_{t1} + \omega_s l_2 i_{m2} + (r_2 + l_2 p) i_{t2} \end{cases} \tag{4}$$

空载时，$i_{m1} = i_{t1} = 0$，代入式 (4)化简得

$$\begin{cases} u_{m1} = l_m p i_{m2} - \omega_1 l_m i_{t2} \\ u_{t1} = \omega_1 l_m i_{m2} + l_m p i_{t2} \\ u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{t2} \\ u_{t2} = \omega_s l_2 i_{m2} + (r_2 + l_2 p) i_{t2} \end{cases} \tag{5}$$

式 (5)即为发电机空载时的数学模型。

1.3 磁场定向下发电机空载并网控制策略

为了使定子电压的相位、幅值、频率同电网电压保持一致，满足并网要求，需要根据电网电压的信息来对转子励磁电流进行控制。由于大容量发电机在工频下电感远大于电阻，所以电阻可以忽略不计。选取 m轴方向与定子磁链方向重合，定子端电压矢量 u 滞后磁链矢量 ψ_1 90°，u_m为三相系统相电压的幅值，如图 1所示。

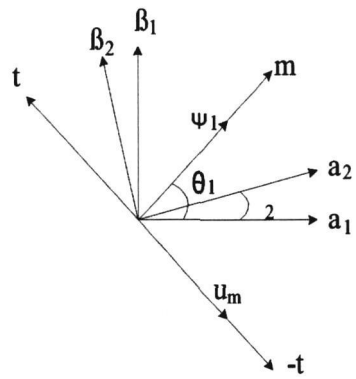

图 1 定子磁场定向示意图

于是，可得

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi \\ \psi_{t1} = 0 \\ u_{m1} = 0 \\ u_{t1} = -u_m \end{cases} \tag{6}$$

将式 (4)带入式 (1)，略去定子电阻，得

$$\begin{cases} \psi_1 = 0 \\ \psi_1 = u_m / \omega_1 \end{cases} \tag{7}$$

于是式 (2)可化简为以下两式

$$\begin{cases} \psi_1 = -l_m i_{m2} \\ i_{t2} = 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = l_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

将式 (9)代入式 (5)可得

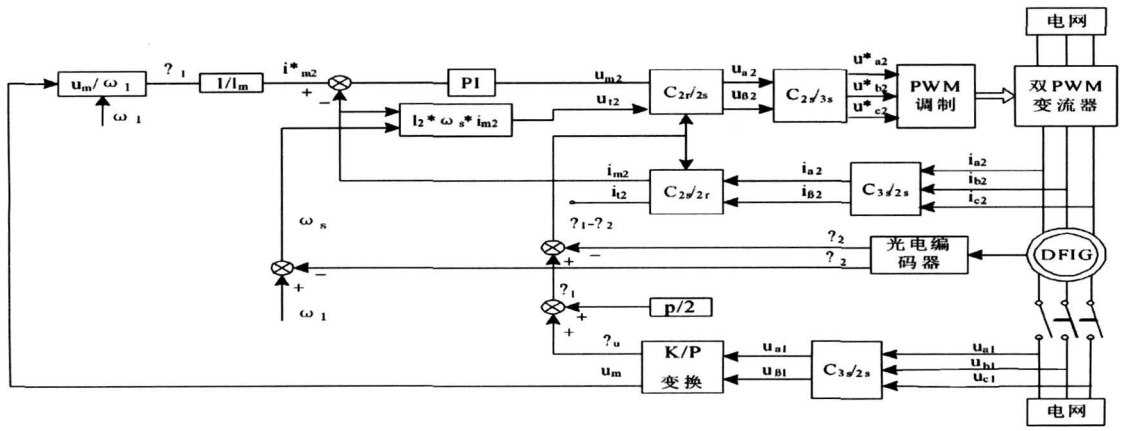

图 2 变速恒频双馈风力发电机并网控制策略框图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{cases} u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} \\ u_{t2} = \omega_s l_2 i_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(6)～(10)可得到变速恒频双馈风力发电机并网控制策略[4],图 2为其原理图。

2 系统仿真分析

利用 Matlab软件建立空载并网仿真模型,以下对系统空载、并网过渡过程进行了仿真研究。

双馈异步发电机的仿真参数为:定子绕组电阻 $R_1=1.9188\ \Omega$;转子绕组电阻 $R_2=2.5712\ \Omega$;定子自感 $L_1=0.24144$ H;转子自感 $L_2=0.24144$ H;定转子互感 $L_m=0.2340$ H;电网电压取 $u_{net}=300$ V; $n_p=2$;转动惯量 $J=0.2$ kgm^2。

并网前,取电网电压幅值、频率、相位信息作为控制依据,经过控制系统调节发电机的转子励磁电压,控制发电机的输出定子电压,满足并网条件后进行并网。并网成功后切换为发电控制模式。

仿真过程如下,发电机在 1 200 r/min转速下空载稳态运行 1 s后并网,空载调节过程、并网过渡过程转子电流波形如图 3、4、5所示。

由图 3可见, i_{m2}很快跟踪到 i^*_{m2}上, i_{t2}也很快稳定且几乎为零,这与前文中式(8)相符,说明达到了控制目的。由图 4可见,定子 a相输出电压 u_{a1}能迅速

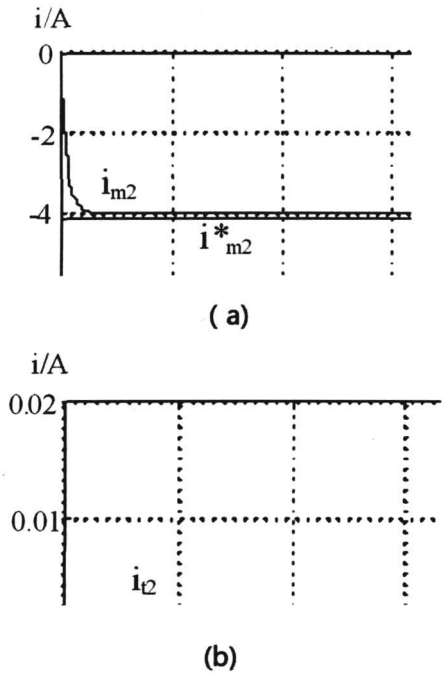

图 3 转子电流分量 i_{m2}、i_{t2}的波形

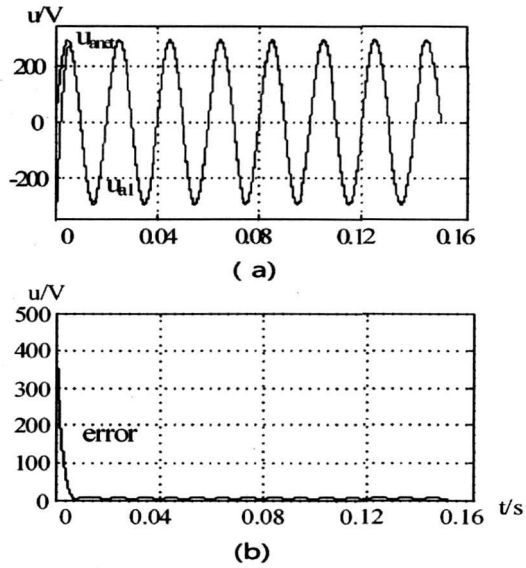

图 4 定子电压、定子电压与电网电压误差波形

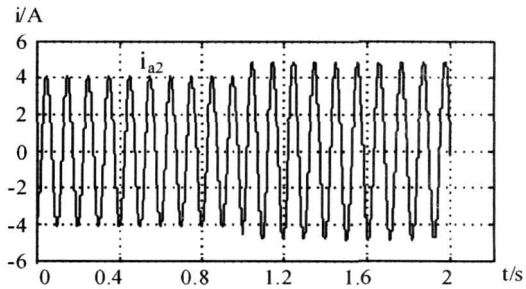

图 5 转子 a相电流并网过渡过程波形

跟踪电网 a相电压 u_{anet},两者之间的误差在半个周波之内就达到 10 V以下,说明调节过程快、精度高。图 5为转子 a相电流并网过渡过程的波形,可见在并网过渡过程中,转子 a相电流 i_{a2}没有太大波动,过渡比较平稳,对电网不会造成太大影响,完全满足并网要求。

3 结 论

建立了变速恒频双馈风力发电系统的空载仿真模型,采用矢量控制技术,进行了发电机空载仿真、并网过渡过程仿真研究。仿真结果表明,空载调节过程速度快,精度较高,并网过程电流冲击较小,此种并网策略是变速恒频双馈风力发电机一种较理想的并网方式。

参考文献

[1] Petersson A, Harnefors L, Thitinger T. Evaluation of

(下转第 37页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结 论

4.1 可靠性分析结论

(1)各种接线模式的可靠性随负荷密度的增大而提高,负荷密度最大时,相应的可靠性最高。这是因为负荷密度增大而保持变电站容量不变,意味着供电半径将缩小,变电站到负荷的出线长度将会减短。由于线路的平均故障率与线路长度成正比关系,所以配电系统的可靠性指标会相应地提高。

(2)对于完全由架空线组成的电网,可靠性由低到高的顺序依次是单辐射接线模式、手拉手接线模式、分段两联络接线模式和分段三联络接线模式。对于分段联络接线模式,由于出现故障时每条线路都能通过各自的联络线路恢复供电,这样使每条线路的故障范围缩小,即受影响的用户数比手拉手接线要有所减少,因此它的可靠性比手拉手接线模式略有提高。

(3)对于完全由电缆线组成的电网,可靠性由低到高的顺序依次是单辐射接线模式、手拉手接线模式、双∏接线 (分段两联络接线)模式、"N-1"接线模式。在"N-1"接线中,N值越大,则线路发生多重故障时有负荷不能转出的概率越大,倒闸操作也越复杂,因此可靠性也会有所降低。对于电缆线路形成的电网,从可靠性分析角度来看,分段两联络接线模式和"N-1"接线模式最优。

4.2 经济性分析结论

(1)随着负荷密度的增大,各接线模式的总费用减小。这是因为负荷密度增大而保持变电站容量不变,意味着供电半径将缩小,变电站到负荷的出线长度减短,线路投资也相应的减小,年总费用就会下降。

(2)对于由架空线组成的电网,当负荷密度较低时,采用单辐射接线模式最经济。当负荷密度逐渐增大时,由于总的年费用降低,各接线模式之间的年总费用差距越来越小,因而此时采用可靠性和导线利用率较高的分断联络接线模式会更好。

(3)对于电缆的"N-1"接线而言,"5-1"接线的经济性比其他几种要好一些,原因是它所需要的备用线路最少。在全部的电缆线路接线模式中,当负荷密度较低时,采用单辐射接线模式最经济;当负荷密度逐渐增大时,由于总的年费用降低,各接线模式之间的年总费用差距越来越小,因而此时采用可靠性和导线利用率较高的双∏接线和"N-1"接线模式会更好。

参考文献

[1] DL/T 599-2005,城市中低压配电网改造技术导则[S].北京:中国电力出版社,2006.

[2] 能源部,建设部.城市电力网规划技术导则[M].北京:水利水电出版社,1995.

[3] 王晓文.供用电系统[M].北京:中国电力出版社,2005.

[4] 王成山,王赛一,葛少云,等.中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J].电力系统自动化,2002,26(24):34-39.

(收稿日期:2009-10-12)

(上接第 9页)

Current Control Mehtods for Wind Turbines Using Doubly-fed Induction Machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(1): 227-235.

[2] 林成武,王凤翔,姚兴佳.变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究[J].中国电机工程学报,2003,23(11):122-125.

[3] 卞松江,吕晓美,相会杰.交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25(16):57-62.

[4] 刘其辉,贺益康,卞松江.变速恒频风力发电机空载并网控制[J].中国电机工程学报,2004,24(3):6-11.

作者简介:

赵 宇(1985-),男,硕士研究生,研究方向为非线性控制技术在风力发电系统中的应用;

王 奔(1960-),男,教授,研究方向为电力系统非线性与变结构控制。

张喜海(1983-),男,硕士研究生,研究方向风力发电系统控制技术;

李 慧(1985-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量控制。

(收稿日期:2010-01-10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

宝鸡—德阳 HVDC换相失败仿真分析

张 强,欧阳瑞,冯 中
(绵阳市电业局游仙供电局,四川 绵阳 621000)

摘 要:换相失败是高压直流输电技术中逆变器最常见故障之一。以 2010华北—华中联网数据为基础,采用 PSS/E分析了四川电网故障对宝鸡—德阳规划高压直流项目的换相失败影响,讨论了调整直流系统运行参数以改善换相失败的措施。仿真分析结果表明,四川省内大部分 500 kV交流短路故障都将导致直流系统换相失败,但故障清除后直流系统均能较快恢复运行,直流系统运行参数对换相失败影响较大。

关键词:宝鸡—德阳直流工程;换相失败;PSS/E

Abstract: Commutation failure is one of the common failures in inverters of HVDC transmission system. According to the data of Northeast China—Central China Power Grid in 2010, the influence the failures of Sichuan Power Grid on the commutation failures of the planning Baoji—Deyang HVDC transmission system is analyzed using PSS/E. Measures of adjusting HVDC operating parameters are discussed to improve the performance of HVDC system during commutation failures. Simulation results show that the Baoji—Deyang HVDC system will suffer commutation failures with most of the 500 kV faults of Sichuan Power Grid, but it can rapidly recover from commutation failures after the fault is cleared. Operating parameters of HVDC system is of great influence on the commutation failures.

Key words: Baoji—Deyang HVDC project; commutation failure; PSS/E

中图分类号:TM 743 **文献标志码**:A **文章编号**:1003—6954(2010)02—0010—04

根据国家电网公司规划,西北—华北第二回直流联络线将于 2010年建成,线路起点位于陕西宝鸡换流站,落点为四川德阳万寿桥换流站。线路长度为 574 km,工程额定直流电压 ±500 kV,额定电流为 3 kA,双极额定输送容量为 3 000 MW。该工程建成后可以实现西北火电与四川水电的互援互济,显著提高系统经济性。

换相失败(commutation failure, CF)是直流系统最常见的故障之一。一般的单次换相失败仅会导致短暂的功率中断,其对系统的影响并不严重。但如果直流系统恢复中出现连续换相失败将有可能导致直流线路发生闭锁,从而引起较严重的稳定问题。宝鸡—德阳直流线落点于德阳,靠近成都、德阳和绵阳等重负荷区,因此需要研究直流线路发生换相失败对系统的影响。

以 2010年华北—华中联网电网为基础数据,利用 PSS/E(power system simulator for engineering)分析宝鸡—德阳单极投运时四川电网交流故障对该线路换相失败的影响,并分析了直流系统控制参数对直流电路换相失败的影响。

1 换相失败机理分析与换相失败判据

当逆变侧换流器两个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀在承受反向电压的时间内,如果换流阀载流子未能完成复合并恢复正向阻断能力,或在反向电压持续期间未能完成换相,此时当阀两侧电压变为正向后,预定退出阀将发生误导通,从而引起换相失败。

正常运行时逆变侧换相重叠角的计算公式为[1]

$$\mu = \beta - \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_d X_C}{U_{ac}} + \cos(\beta)\right) \qquad (1)$$

式中,β为超前触发角;I_d为直流线路电流;X_C为换相电抗;U_{ac}为换流变电网侧交流电压折算到阀侧的换相电压。

从式中可以看出,当交流系统故障导致逆变侧换相电压 U_{ac}下降后,换相重叠角将增大,致使待退出阀建立恢复阻断的时间(熄弧角)变小,从而导致直流线路换相失败发生。

准确判断直流线路换相失败的判据是换相完成后换流阀承受反向电压—时间面积,实际分析中一般

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

取熄弧角 γ为换相判据。这种判据一般较常见于电磁暂态分析模型。但是对于电网分析中更常用的机电暂态分析程序,一般都采用简单的换相失败电压判据。电力系统综合分析程序 PSASP采用经验判据,认为逆变侧交流电压下降至 0.7 p.u.直流线路即发生换相失败,高于 0.7 p.u.即恢复换相[2]; BPA采用逆变侧交流母线电压和电压下降率同时判断直流线路换相失败,可指定不同的换相失败电压和恢复换相电压[3]; PSS/E中的 CDC4T、CDC6T等模型也可以指定交流母线电压判定直流线路换相失败[4]。

文献[5]指出直流线路发生换相失败时的电压跌落可以表示为

$$\Delta V = 1 - \frac{I'_d}{I_d} \frac{X_{Cpu}}{X_{Cpu} + \cos\gamma_{CF} - \cos\gamma} \qquad (2)$$

式中, I'_d 为直流电流变化; X_{Cpu}为换相电抗标幺值,一般就是换流变短路电抗; γ_{CF}是发生换相失败时的最小熄弧角; γ为正常运行时的熄弧角。

上式的简单分析和文献[6]的分析结果也表明,换相失败电压随线路运行状态变化而变化,并非一个固定值。因此,像 PSASP那样采用固定的换相失败电压值判断不同运行下直流系统换相失败是不合理的,可能造成分析错误。

但是,由于采用 γ角判据的电磁暂态分析存在仿真规模的限制,在分析大规模交直流电力系统动态特性时只能采用机电暂态换相失败电压判据。而且,从式(2)可以看出,在确定的运行方式下,最小熄弧角判据和最小电压跌落判据对于判定直流线路换相失败的结果是一致的,两参数满足上式约束。因此,根据式(2)确定的换相失败电压,利用 BPA或 PSS/E等工具分析在确定运行方式下直流系统换相失败是可取的。

利用 PSS/E分析宝鸡—德阳直流系统的换相失败特性。取直流线路初始运行状态为整流测定整流侧直流功率为 1 500 MW,逆变侧定整流侧电压为 500 kV,整流侧燃弧角为 16.262°,逆变侧熄弧角为 17.789 8°,万寿桥母线电压为 0.995 2 p.u.。逆变侧送出功率 1 428 MW,逆变侧采用 6组并联电容器组作为无功补偿,每组容量 120 Mvar;逆变侧换流变短路阻抗为 16.8%。取换相失败熄弧角为 8°,通过式(2)可计算得到换相失败压降为 ΔV=0.184 8,换相失败电压为 U_{ac}=0.811 3 p.u.。

2 CDC6T模型的换相失败判据

PSS/E是目前公认的分析交直流电力系统机电暂态较好的软件。该软件内建了数种准稳态直流模型,其中以 CDC4T和 CDC6T模型较为常用。CDC6T是 CDC4T模型的扩展,其换相失败控制与换相恢复策略如下。

(1)换相失败策略:当逆变侧换流母线交流电压持续低于换相失败电压 VACBYP(CON(J+27))不少于时间 TDEBYP(CON(J+28))(交流电压判据,延迟换相失败)或逆变侧直流电压低于换相失败直流电压 VBYPAS(CON(J+7), kV)(直流电压判据,立即换相失败)时,直流线路发生换相失败,程序以旁通模拟。在旁通过程中,线路电流仍维持为正常运行电流,但逆变侧直流电压将为 0,整流侧直流电压降低以维持线路电流。

(2)换相失败恢复策略:当线路旁通时间不少于最小旁通时间 TBYPSA(CON(J+10)),且逆变侧换流母线交流电压持续高于解除旁通电压 VUNBY(CON(J+8))不少于持续时间 TUNBYP(CON(J+30))后,直流线路恢复换相。

取宝鸡—德阳直流线路换相失败交流电压为 0.811 3 p.u.,换相失败直流电压为 350 kV,且不考虑延迟换相失败;最小换相失败时间 0.1 s,换相失败恢复判据为换流母线电压持续高于 0.85 p.u.不少于 0.1 s。

需要说明的是,CDC6T由于是准稳态模型,无法模拟非对称故障对直流系统换相的影响。当需要详细研究非对称故障对直流系统的影响时,一般需要采用电磁暂态模型进行分析,譬如 PSCAD/EMTDC等软件。

3 线路短路故障对换相失败的影响

重点分析了 500 kV线路两侧分别发生短路故障对宝鸡—德阳直流线路换相失败的影响。故障设置为 0.1 s线路一侧发生短路故障, 0.1 s后通过切除故障线路清除故障,仿真时长 5.0 s。

3.1 机电暂态仿真分析结果

对四川省内的所有 500 kV线路进行 N-1暂态仿真分析可知,四川省内绝大部分 500 kV线路短路

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

故障均会导致直流线路发生换相失败。表 1为导致直流线路换相失败的故障仿真结果，表中，t_{CF}为发生换相失败时刻，V_{CF}为换相失败时刻万寿桥母线电压。由于 PSS/E中线路一侧发生短路与该侧母线短路在故障期间响应结果一致，表中以母线形式列出。

表 1 换相失败故障信息

故障侧母线	t_{CF} /s	V_{CF} /p u
万寿桥 500 kV	0.100	0.000 0
谭家湾 500 kV	0.100	0.000 0
龙王 500 kV	0.100	0.288 0
丹景 500 kV	0.100	0.320 2
绵阳 500 kV	0.100	0.363 5
蜀州 500 kV	0.100	0.404 5
尖山 500 kV	0.100	0.406 6
太白 500 kV	0.100	0.581 0
紫坪铺 500 kV	0.100	0.586 2
茂县 500 kV	0.100	0.592 9
雅安 500 kV	0.100	0.604 0
南充 500 kV	0.100	0.610 7
东坡 500 kV	0.100	0.618 1
洪沟 500 kV	0.100	0.635 2
广元 500 kV	0.100	0.689 1
黄岩 500 kV	0.100	0.697 3
广安 500 kV	0.100	0.706 1
南天 500 kV	0.100	0.781 9
石棉 500 kV	0.100	0.788 2
大杠 500 kV	0.100	0.804 0
泸州 500 kV	0.100	0.808 6
临巴 500 kV	0.100	0.810 5
龙头石 500 kV	0.104	0.808 6
达州 500 kV	0.100	0.820 2
普提 500 kV	0.106	0.810 7
瀑布沟 500 kV	0.124	0.810 7

从表 1可以看出，绝大部分故障在 0.1 s故障时刻即发生换相失败，也有部分故障在故障期间换相失败。受 PSS/E仿真结果输出的影响，PSS/E输出的 0.1 s网络故障时刻的电压值为判断直流线路是否发生换相失败后的电压值，该值并不是实际判定直流线路换相失败的电压，因此存在部分故障如达州 500 kV母线附近线路短路故障后其输出电压高于换相失败电压但线路仍然换相失败的现象。

表 2为不会导致直流线路换相失败的故障信息，表中 $V_{0.1}$为故障时刻万寿桥母线电压。

下面将仿真结果按照故障时刻换相失败、故障中换相失败和未发生换相失败分成 3类，分别分析直流线路的动态过程。

表 2 不发生换相失败故障信息

故障侧母线	$V_{0.1}$ /p u
叙府 500 kV	0.861 4
九龙 500 kV	0.878 3
二滩 500 kV	0.893 1
西昌变 500 kV	0.894 9
石板箐 500 kV	0.913 3

3.2 故障时刻换相失败算例

以谭家湾—龙王线谭家湾侧发生短路故障为例，仿真过程中万寿桥站母线电压如图 1所示。从图 1中可以看出，故障后逆变侧交流母线电压迅速下降至接近 0，逆变侧发生换相失败。

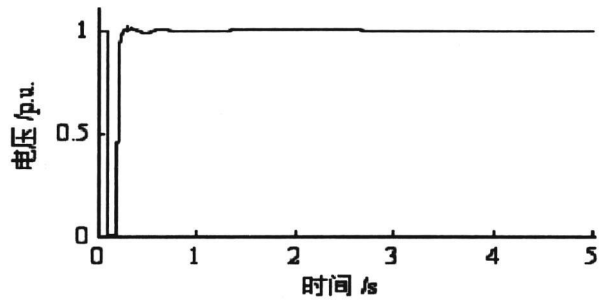

图 1 谭家湾—龙王线故障万寿桥电压曲线

图 2为直流线路直流电流曲线。从图 2中可以看出，故障过程中直流线路电流维持在 3.0 kA，故障切除后 0.1 s即 0.3 s时，直流线路满足恢复换相条件。在换相失败恢复过程中，直流电流按照设定增长速率迅速恢复至额定值。

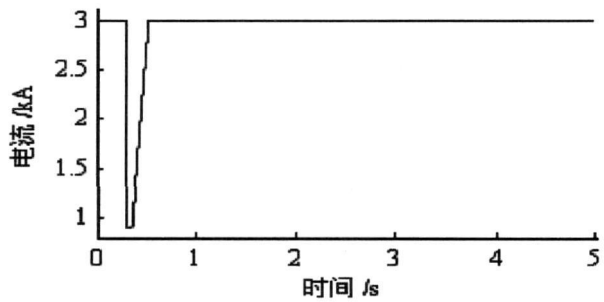

图 2 谭家湾—龙王线故障直流电流曲线

图 3为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。可以看到，逆变侧直流电压在故障中为 0，整流侧电压大约为 24 kV以维持直流电流。

3.3 故障过程中换相失败算例

以瀑布沟—东坡线瀑布沟侧发生短路故障为例，仿真过程中万寿桥站母线电压如图 4所示。从图 4中可以看出，虽然故障时刻逆变侧母线电压尚未低于设定换相失败电压，但故障中换流站交流母线电压持续下降，直至 0.124 s电压低于换相失败电压，直流

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线路发生换相失败。

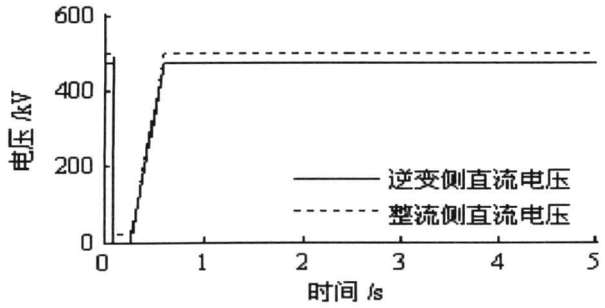

图 3 谭家湾—龙王线故障直流电压曲线

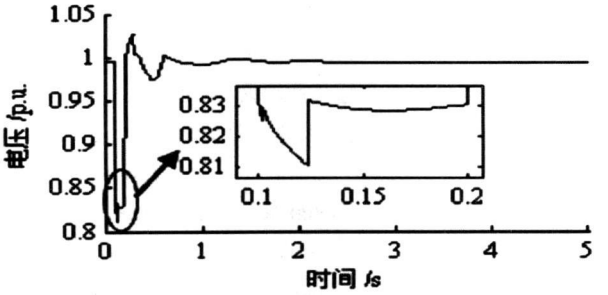

图 4 瀑布沟—东坡线故障万寿桥电压曲线

图 5为直流线路直流电流曲线,图 6为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。从图中可以看出,由于故障时刻交流电压下降,逆变侧和整流侧直流电压都迅速下降。由于直流线路定功率运行,直流电流上升,以维持功率恒定。在 0.102 s时刻,逆变侧直流电压低于 400 kV,直流线路转入定电流控制方式,直流电流限制为 3.0 kA。故障清除 0.1 s后 (即 0.3 s时),直流线路满足恢复换相条件,直流电流和直流电压按照预定恢复速度恢复。

3.4 不发生换相失败算例

以洪沟—叙府线叙府侧发生短路故障为例,仿真过程中万寿桥站母线电压如图 7所示。故障后万寿桥站电压下降为 0.861 4 p u,直流线路不发生换相失败。

图 8为直流线路直流电流曲线,图 9为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。从图中可以看出,

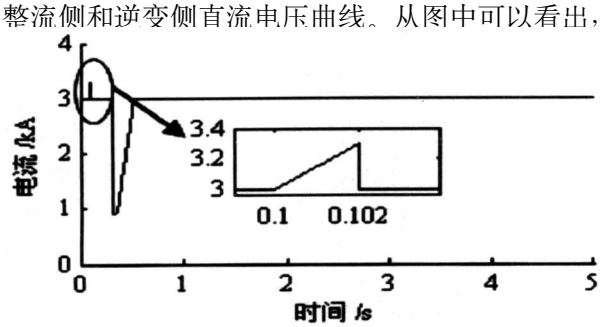

图 5 瀑布沟—东坡线故障直流电流曲线

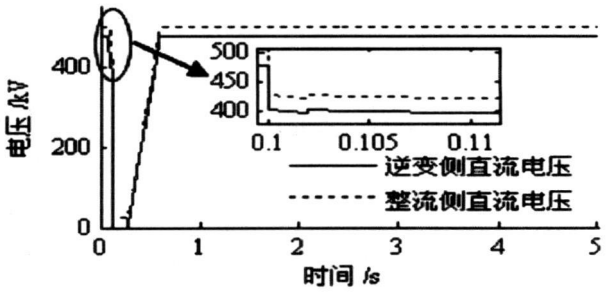

图 6 瀑布沟—东坡线故障直流电压曲线

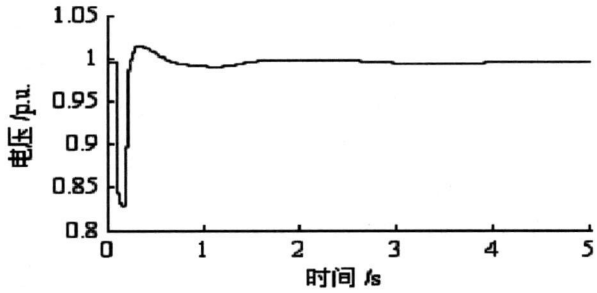

图 7 洪沟—叙府线故障万寿桥电压曲线

由于故障时刻交流电压下降,逆变侧和整流侧直流电压都迅速下降。由于直流线路定功率运行,直流电流上升,以维持功率恒定。在 0.102 s时,由于直流系统低压限流 (voltage dependent current order limiter VDCOL)的作用,直流电流 被 限 制 在 3.3 kA 。在 0.124 s时刻,逆变侧直流电流低于 400 kV,直流线路转入定电流控制方式,直流电流限制为 3.0 kA。故障清除后 (即 0.2 s时),直流线路恢复正常运行。

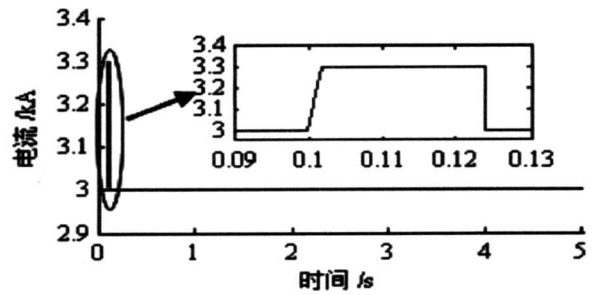

图 8 洪沟—叙府线故障直流电流曲线

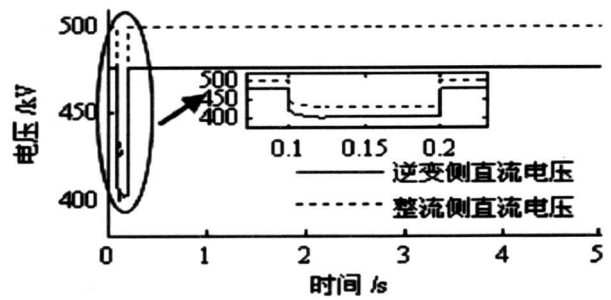

图 9 洪沟—叙府线故障直流电压曲线

(下转第 59页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

连接的网线、交换机本身进行了检查,均无发现故障。后经监控系统厂家人员检查确定,认为问题是由后台监控机 SAC2的 Windows操作系统程序走死引起,网络资源不足导致后台监控机死机。

找出问题后,厂家将后台监控机的监控程序版本升级,并经系统双机切换测试。当其中一台后台监控机网络中断或有异常时,监控系统能将另一台备用机自动切换成主机运行。

变电站实现综合自动化后,很多的运行维护工作都需要通过微机装置来完成。但综合自动化装置的软硬件更新换代非常快,所选用的设备可能很快就变成落后产品;监控软件有时会存在难以发现的缺陷,以至导致监控维护工作不能正常进行,影响了变电站的安全运转。这也提醒设计人员在选择综合自动化产品及后台监控系统时,要综合考虑多方面因素,选出一种程序运行稳定、功能齐全、软硬件配置相对超前的综合自动化产品。

4 结束语

变电站实现综合自动化是今后发展的一种必然趋势,其优越性在电能质量、变电站的安全、可靠运行水平等方面均有较好的体现。但由于综合自动化设备整体的技术还不够成熟、稳定,所以在实施运行中总会出现各种不同的问题,还需要在实际工作中不断总结经验。这里旨在抛砖引玉,把自己工作中的经验总结出来共同分享,以提高综合自动化技术水平。

(收稿日期: 2009－11－02)

(上接第 13页)

4 减少直流线路换相失败措施的讨论

从直流线路运行状态的角度考虑,不同的运行状态参数下直流系统抗换相失败的能力是不同的。从式(2)可以看出,当线路运行电流固定且换流变固定时,增大正常运行下的熄弧角 γ_r可以提高直流线路换相失败容许相对电压降落,同时,提高初始运行状态下的逆变侧换流母线电压也可以提高绝对电压跌落。例如,增加 2组并联补偿后,交流电压为 1.010 p.u.,γ增加为 18.023 1°,此时 $\Delta V=0.189\ 7$,略有升高。但是,增大熄弧角会导致直流线路吸收无功增大,从而降低正常运行时的逆变侧交流母线电压。因此,这两个因素在调节时需要彼此协调,既考虑对换相失败的控制,同时考虑无功补偿的成本。

换相电抗 $X_{C\,pu}$在换流变型号固定后也是一个固定的参数,但在规划设计阶段,可以认为这个参数也是可变的。采取措施降低直流线路换相电抗可以有效提高直流系统抗换相失败的能力。例如,降低换相电抗至 10%后,$\Delta V=0.275\ 8$,增加明显。但是换相电抗也不能降至太小,否则会导致直流落点地区短路电流增大。

5 结 论

以上分析了宝鸡－德阳 HVDC输电系统单极投产时四川电网故障对直流线路换相失败的影响。仿真分析结果表明,四川电网内绝大多数线路短路故障都将导致直流线路发生换相失败;故障清除后,直流线路都能迅速恢复运行,且不会造成连续换相失败。分析了直流系统运行参数对换相失败的影响,各参数之间需要彼此协调以达到控制换相失败和提高运行经济性的目的。

参考文献

[1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

[2] 中国电科院. PSASP用户手册 [M]. 北京:中国电科院, 2007.

[3] 中国电科院. BPA用户手册 [M]. 北京:中国电科院, 2004.

[4] SIEMENS and PTI. PSS/E User Manual [M]. USA, 2007.

[5] Thio C. V., Davies J. B., Kent K. L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems [IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(2): 946－957.

[6] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 4－8.

作者简介:

张 强(1975－),男,工程师,主要研究方向为电力系统自动化分析。

欧阳瑞(1975－),男,助理工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

冯 中(1982－),男,助理工程师,主要研究方向为变电站稳态分析。

(收稿日期: 2009－10－19)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

输电线路雷击概率及影响因素研究

李瑞芳,吴广宁,马御堂,甘立勇
(西南交通大学,四川 成都 610031)

摘 要:雷击概率的研究对于有效的防雷、减小雷灾造成的危害有着非常重要的意义。首先分析了雷击的基本物理过程,根据雷击路径与场强最大方向一致的原理,假定场强最大方向为雷击概率较大的方向。在此基础上建立了雷击过程中先导放电阶段上下行先导电场分布的物理模型。分别研究了输电线路高度、所带电压极性、雷击角度几方面的因素对于雷击概率的影响,并得出以上几种因素对雷击概率影响的变化规律。对输电线路防雷工程有一定指导作用。

关键词:雷击概率;电压极性;雷击角度

Abstract: Research of lightning stroke probability is very important to effective protection against lightning and decreasing the disaster caused by the lightning. Basic physical process is analyzed firstly. Let it be supposed that the direction of the largest electric field is also the direction of the largest lightning stroke probability, according to the principle that both the lightning path and the largest electric field are in the same direction. The physical model of leader discharge process on lighting paths is established based on the above-mentioned theory. The effects of the height of transmission lines, voltage polarity and lightning stroke angle on lightning stroke probability are researched respectively and the conclusion is obtained, which are useful to guide the protection project against lightning for transmission lines.

Key words: lightning stroke probability; voltage polarity; lightning stroke angle

中图分类号:TM862 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0018-03

0 引 言

雷电是大自然中最宏伟壮观的气体放电现象,对人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质文明构成巨大的威胁,如森林火灾有 50%以上是由雷电引起的[1]。随着现代化进程的加快,特别是信息产业的迅猛发展,自动控制、通讯和计算机等微电子设备在各行各业得到日益广泛的应用。雷电更加严重地对电力、广播电视、航空航天等行业产生危害。

国内外对雷电展开了大量的研究,主要是包括研究本身雷击通道的物理过程以及雷击概率受相关因素的影响等两个方面。研究雷击的概率是采取适当防雷措施的基础。在此方面国内做了一部分研究工作。湖南大学徐勇等研究了大气条件对空气间隙放电特性的影响[2];武汉高压研究所钟连宏等研究了土壤电阻率对火花放电过程的影响[3];广西大学王巨丰等研究了放电通道场强对放电方向的影响以及接地金属体高度对雷击概率的影响[4,5];国内外对于输电线路雷击跳闸本身研究也非常成熟,包括用规程法、电气几何模型法、先导法[6,7],对于绕击的研究和用规程法、PSCAD等电磁暂态仿真软件对反击的研究。但是国内外尚未从电场角度研究输电线路的雷击概率。下面从影响输电线路雷击概率的一些因素,包括线路高度、电压极性、雷击角度等方面展开研究,为输电线路雷击的研究打下了一定基础。

1 模型介绍

1.1 雷击的物理过程分析

当下行先导下落的过程中,地面物体的表面场强不断增长[6]。当地面某目的物表面场强达到上行先导起始场强时,地面物体开始产生迎面上行先导,称此时下行先导的位置为一级定位点。此后,随着下行先导的下落,可能有更多的地面目的物产生迎面先导。击中点的确定取决于下行先导和上行先导的相对传播和最后跃变过程,最先与下行先导达到最后跃变的上行先导将成为击中点。成为击中点的物体也可能不产生迎面先导,当下行先导的流注抵达该目的物,并且其间的平均场强超过击穿临界值时,击穿也

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

会发生。这里称发生最后跃变前的下行先导位置为二级定位点,简称定位点。根据雷击路径方向与场强最大方向一致的原理[4,5],定位点的路径主要取决于场强的大小,因此这里所做的工作都假定场强大的物体更容易引雷。

1.2 模型的建立

文中模型的建立主要是模拟各种因素对雷击概率的影响。根据前面的雷击过程分析,雷击在二级定位点的时候发生跃变,参考文献[9]把最后跃变部分的下行先导用一个圆棒来等效,被雷击物体同样用圆棒来表示。闪击距离认为在 5～60 m之间[10],雷电放电的临界场强在 2 500～3 000 kV/m[11],因此最后跃变部分时下行先导与被击物体之间的电位在 10 000 kV左右。文中研究的是尚未形成主放电前不同因素的上行先导对上行先导的吸引作用,因此文中下行先导的电压取值 9 000 kV。

2 不同因素对雷击概率影响的仿真

2.1 高度变化对雷击概率的影响研究

图 1为模拟输电线路高度变化对电场强度影响的示意图。图 1中中间白色矩形部分为圆棒,表示最后跃变部分的下行先导。从该仿真图便可以看到,水平位置高的输电线(1号输电线)表面场强明显大于位置相对较低的输电线(2号输电线)。保持 2号输电线路的高度 20 m不变,改变 1号线路的高度,图 2和图 3分别为随着 1号线路高度增加时,1号线路表面场强和 2号线路表面场强的变化情况。

从图 2、图 3中看到:当 1号输电线高度大于 20,

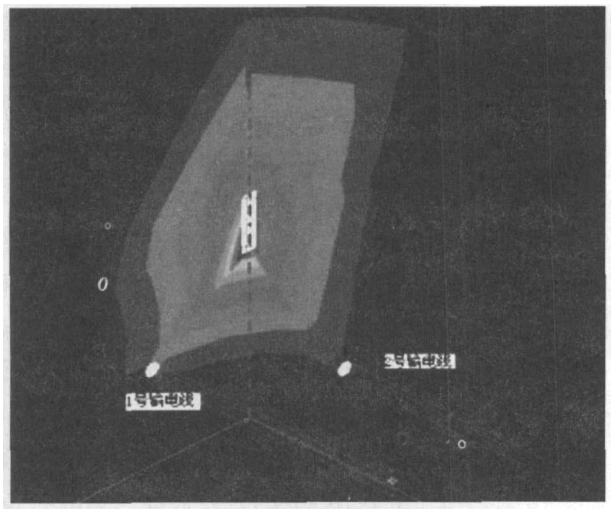

图 1 高度变化对雷击概率影响的电场分布图

即 1号输电线高于 2号输电线时,1号输电线顶部场强大于 2号输电线,这是因为 1号输电线高于 2号输电线,因此对 2号输电线有一定屏蔽作用,2号输电线被保护,被雷击的概率比 1号输电线小。当 1、2号输电线高度相等时,场强相同,互相都无屏蔽作用。当 1号输电线垂直高度小于 2号输电线,即 1号输电线低于 2号输电线时,同样 2号输电线对 1号输电线起到屏蔽作用,1号输电线被雷击概率减小。从两条曲线中还可以看出,随着高度的增加,1号输电线表面的场强增加很快,2号输电线的场强随着 1号输电线场强的增加而减小,但减小的趋势较为缓慢。分析认为:1号输电线的高度本身在不断变化,高度对场强大小又有着直接的影响,因此 1号输电线的表面场强变化较快,2号输电线本身的高度不变,之所以场强被削弱是因为 1号输电线对表面雷击方向的吸引能力的增强间接削弱了 2号输电线表面的场强,因此 2号输电线表面的场强变化较慢。

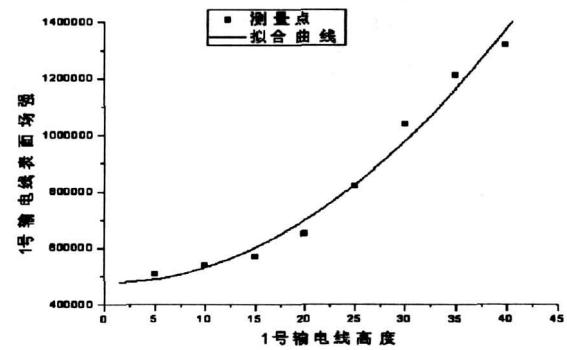

图 2 1号线路表面场强变化情况

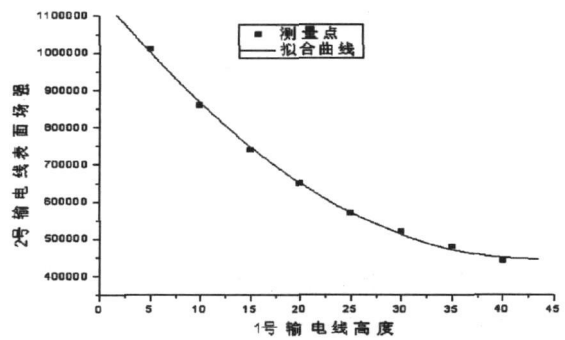

图 3 2号线路表面场强变化情况

2.2 输电线路电压极性对雷击概率的影响研究

本文研究了随着电压等级的变化正负极性对输电线路表面场强的影响。从图 4可以看出,当输电线路负载电压较小,即电压小于或等于 10 kV的时候,负载电压极性对输电线表面电场强度几乎没什么影响,这时电压极性对雷击概率的影响可忽略。随着负

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

载电压的逐渐增大,当电压大于或等于 220 kV时候,同一电压等级正负极性对输电线表面电场强度的影响逐渐增大,从图 4中还可以看出,负载电压为正极性的输电线路表面场强明显大于负载为负极性的输电线。原因很简单,多数情况下引发雷击的带电云层所带电荷为负极性,由于电荷的同性相斥,异性相吸,因此正极性线路表面场强大于负极性线路。这使得高电压输电线路在运输电压等级相同时,负载电压为正极性的情况下更容易遭受雷击。尤其是当电压等级达到 1 200 kV及以上时,这种情况更容易发生。因此在实际应用中,高电压输电线路负载电压极性对雷击概率的影响应当充分考虑。

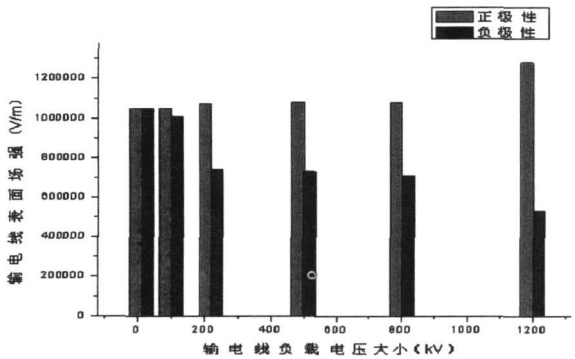

图 4 电场强度随电压变化的柱状图

2.3 雷击入射角变化对雷击概率的影响

雷击入射角对雷击概率有何种影响,至今这方面的研究尚属空白,文中在此方面做了初步的探讨。根据 BROWN和 WHITEHEAD于 1969年提出的,雷击物体假定先导接近地面的入射角服从某一给定的分布函数[12],如式 (1)所示。

$$g(\phi)=\begin{cases}0 & \phi<-\dfrac{\pi}{2}\\ \dfrac{2}{\pi}\cos^2\phi & -\dfrac{\pi}{2}\leqslant\phi\leqslant\dfrac{\pi}{2}\\ 0 & \dfrac{\pi}{2}<\phi\end{cases}\qquad(1)$$

文中对雷击角度对雷击概率的影响做了初步的仿真研究,雷击倾角存在时电场分布示意图如图 5所示。图 6为输电线表面电场强度变化与雷击倾角的变化规律图。从图 6上可以看出,随着入射倾角的增加,顶部的场强逐渐减小,变化规律几乎完全符合下列多项式函数。

$Y=1.18208\times10^{6}-2012.2765X-11.42981X^{2}$

4 结 论

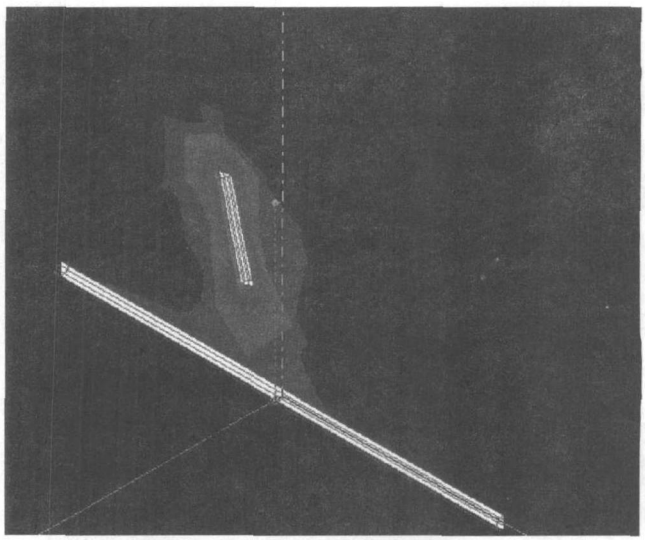

图 5 一定雷击倾角时电场分布示意图

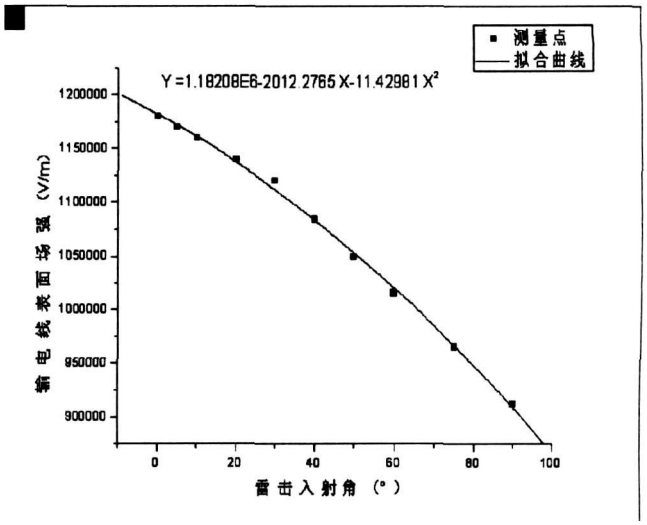

图 6 电场强度随雷击倾角变化曲线图

通过建立雷击过程中先导放电阶段上下行先导电场分布的物理模型,模拟了不同因素对雷击概率的影响,得出了如下结论。

(1) 从电场强度变化的角度分析高度对雷击概率的影响,地面上的两条输电线,当其中一条高度不变,另外一条高度变化的情况下,总体来说输电线路随着高度的增加,雷击概率增大。在高度增加过程中,当该输电线高度小于另一输电线高度时,表面场强小于另外一条输电线,被另外一条输电线屏蔽,被雷击概率较小。两输电线高度相当时,表面场强相同,被击概率相当。随着高度增长,大于另外一条输电线时,表面场强大于另外一条输电线,反过来对另外一条输电线起屏蔽作用。

(2) 输电线负载电压极性对雷击概率的影响如下:当电压小于、等于 10 kV的时候极性对输电线表

(下转第 56页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] 王建,李兴源,邱晓燕.含分布式发电装置的电力系统研究综述[J].电力系统自动化,2005,29(24):90—97.

[2] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2001(6):53—56.

[3] BORGES C L T, FALCAO D M. Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile[J]. In: Proceedings of IEEE Power Tech Conference Bologna(Italy):2003. 5p.

[4] 崔金兰,刘天琪.分布式发电技术及其并网问题研究综述[J].现代电力,2007,3(24):53—57.

[5] Fernando Bastiao Paulo Cruz Rui Fiteiro. Impact of Distributed Generation on Distribution Networks[J]. European Electricity Market 2008. EEM 2008. 5th International Conference on 28—30 May 2008:1 — 6.

[6] 王志群,朱守真,周双喜.分布式电源对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56—60.

[7] 王成山,成凯,谢莹华,郑海峰.配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J].电力系统自动化,2006,30(3):38—43.

[8] Nara K, Hayashi Y, Ikeda k, et al. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators [C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Ohio USA, 2001.

[9] GRIFFIN T, TOMSOVIC K, SECREST D et al. Placement of Dispersed Generation System for Reduced Losses[J]. In: Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Maui(HI, USA), 2000: 1446—1454.

[10] G. Carpinelli Member IEEE, G. Celli Member IEEE, F. Pilo Member IEEE, A. Russo Member IEEE. Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty[J]. Power Tech Proceedings IEEE Porto V, 2001, (4): 7.

[11] CELLI G, PILO F. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Network[J]. In: Proceedings of 22nd IEEE Power Industry Computer Applications Sydney(Australia)2001: 81—86.

[12] 段玉倩,贺家李.遗传算法及其改进[J].电力系统及其自动化学报,1998,10(1):39—52.

[13] 张奇.配电网规划中分布式电源的选址和定容[D].济南:山东大学,2008.

作者简介:

冯 宁(1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化、智能电网;

王 倩(1962—),女,教授,研究方向为电力系统调度及其自动化。

(**收稿日期**:2010—01—20)

(上接第 20页)

面电场强度几乎没什么影响,即电压极性对雷击概率的影响可忽略。当电压大于、等于 220 kV时候,同一电压等级正负极性对输电线表面电场强度的影响逐渐增大,负载电压为正极性的输电线表面场强大,其被雷击概率也大。所以在负载电压等级大于 220 kV时,电压极性对雷击概率的影响应当考虑。

(3)随雷击倾角的增大,输电线被雷击的概率逐渐减小,二者的关系函数呈多项式函数,表达式为:$Y=1.182\,08\times10^{6}-2\,012.276\,5X-11.429\,81X^{2}$,其中 Y为输电线表面场强,X为雷击入射角度。

参考文献

[1] 吴薛红.防雷与接地技术[M].北京:化学工业出版社,2008.

[2] 徐勇,汪霄飞,朱英浩,等.大气条件对空气间隙放电特性的影响及其数值解析式[J].电工技术学报,2007,22(4):21—26.

[3] 钟连宏,常美生.不同土壤电阻率对雷电放电过程的影响[J].高电压技术,1997,23(1):64—66.

[4] 王巨丰,周世濂,田树军,等.基于雷电走向与场强最大方向一致原理的接地导体雷击范围的计算[J].广西电力,2004(6):39—41.

[5] 王巨丰,周世濂,田树军,等.地面上金属接地体高度对雷击概率的影响[J].高电压技术,2005,31(4):64—65.

[6] 王晓彤,施围,刘文泉.改进电气几何模型计算输电线路绕击率[J].高电压技术,1998,24(1):85—87.

[7] 张志劲,司马文霞,蒋兴良.超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J].中国电机工程学报,2005,25(10):1—6.

[8] 钱冠军,王晓瑜,汪雁.输电线路雷击仿真模型[J].中国电机工程学报,1999,19(8):39—44.

[9] 钱冠军,王晓瑜,徐先芝.输电线路绕击分散性的试验研究[J].高电压技术,1998,24(3):17—20.

[10] 孔祥贞,郄秀书,张广庶,等.多接地点的梯级先导及回击过程的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(22):142—147.

[11] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.

[12] 章润陆,陆宠惠,李劲波.输电线路绕击率的探讨[J].高电压技术,1985,1(9):39—45.

作者简介:

李瑞芳(1980—)女,博士研究生,主要从事防雷接地技术的研究。

吴广宁(1969—)男,博士生导师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

马御堂(1986—)男,硕士研究生,主要从事防雷接地技术的研究。

(**收稿日期**:2009—10—22)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大规模互联电网区域间低频振荡实用分析方法

姚天亮[1], 杨德洲[1], 徐宏雷[2]
(1.甘肃省电力设计院,甘肃 兰州 730050; 2.甘肃省电力科学研究院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:结合 PSASP小干扰频域分析与发电机功角曲线时域检测,提出一种大规模电力系统低频振荡实用分析方法。4台机算例研究了发电机模型、励磁系统与负荷模型对振荡模式的影响,验证了所提方法的正确性。运用此方法分析大区域互联全国系统,分两步方便快捷地求出了区域间、弱阻尼主导低频振荡模式。弥补了 PSASP搜索部分特征值时存在的漏根缺陷,并且能准确评估系统真实阻尼水平。

关键词:大规模电力系统;区域间低频振荡;经典二阶模型;功角曲线检测

Abstract: Combining small signal analysis in frequency domain with generator power angle detection in time domain, a practical method of low-frequency oscillation (LFO) analysis in large-scale power systems is proposed. The researches of four machines system reveal the impact of generator model, excitation system and load model on oscillation modes, and it proves the correction of the proposed method. Using this method to analyze the national interconnected power systems, the inter-area weak damping dominant inertial modes are conveniently solved in two steps. And the missing shortcomings when searching some eigenvalues by PSASP are made up, and in the same time the actual damping value of power systems is accurately assessed.

Key words: large-scale power system; inter-area low-frequency oscillation; classical second-order model; power angle curve detection

中图分类号:TM712 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)02-0021-03

0 前 言

实施大规模跨区输电和大区联网工程后,中国地区电网间都是经极少数联络线弱连接,形成了“长线路、重负荷、弱阻尼”的输电格局,并且大容量机组静态快速励磁大大降低了系统的阻尼,很容易造成系统弱阻尼甚至负阻尼而诱发低频振荡。大规模电力系统低频振荡问题越来越成为制约互联电网电能传输的瓶颈和影响电力系统安全稳定的重要因素。

特征值分析方法是电力系统低频振荡分析的经典方法[1],但是电网规模的扩大和新技术的引入使得系统 A阵膨胀至数万阶,QR方法由于存在“维数灾”问题只能望而却步。目前对超大规模电力系统的状态矩阵特征值求解,仍然没有能求出所有低频振荡模式的算法,很难求出所有的主导低频振荡模式。因此,大规模电网低频振荡分析必须通过降阶来求解,然而大面积降低发电机的模型的阶数又大大影响小干扰稳定分析的有效性和可信度。

文献[2]基于电力系统 2阶、3阶解析解提出了大扰动下的功角稳定中起主要作用的仍然是低频振荡模式。PSASP大干扰暂态稳定计算不受系统规模的限制,其功角响应曲线蕴含了多个低频振荡模式相互作用的信息,这样就从理论上提供了直接从系统大、小扰动下的响应曲线来提取振荡模式相关信息的可能性。

下面将综合稳定程序 PSASP中小干扰计算子程序与大干扰暂态稳定功角响应曲线的检测相结合,提出一种可以方便地适用于大规模实际电力系统低频振荡分析的方法,并在四机两区域系统和全国联网后系统验证了该方法的实用性和有效性。

1 利用发电机功角曲线检测低频振荡模式

在基于发电机功角曲线检测低频振荡模式的众多方法中,Prony算法[3-4]提取振荡信号特征具有独特的优势。Prony方法用一组指数项的线性组合来拟合等间隔采样数据,从中直接计算信号的幅值、相位、阻尼因子、频率等信息。大量的仿真计算表明:Prony方法只要拟合阶数选择得当,则拟合精度非常理想;

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

缺点是如果选择拟合阶数过大,容易出现较多模态参数接近的伪模式,并且难以剔除,原因是模式间的非线性复合作用造成的。

文中将 EMD—MORLET(模态分解—连续小波)方法应用于电力系统低频振荡的分析[5],能够实现单个模态的有效分离,准确有效地找到相应模式:首先利用 EMD分解实现信号从高频到低频的有效分离,然后在获取低频振荡模式主要特征的基础上,应用连续小波(Morlet)变换中的解析小波形式有效地提取模态参数。数学模型如下。

发电机转子角偏移时域解及其小波变换形式为

$$\begin{cases} \Delta\delta(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_n t}\sin(\omega_d t+\varphi_0) \\ w(a,b) = \sqrt{a}/2A_0 e^{-\zeta\omega_n b}\Psi^*(a\omega)e^{j(\omega_d b+\varphi_0)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,ζ为阻尼比;ω_d为有阻尼固有频率;ω_n为无阻尼固有频率。再求取模和相角的斜率,即为模态 $a\pm j\omega$的实部和虚部:$a=\zeta\omega_n=-\frac{d}{db}(\ln|W(a,b)|)$,$\omega_d=2\pi f=\frac{d}{db}\angle[W(a,b)]$。阻尼 $\zeta=-a/\sqrt{a^2+\omega_d^2}$。

2 基于 PSASP与曲线检测的低频振荡分析方法

(1)在保证系统的潮流不变、网架结构不变、发电机总数不变的前提下,保留要分析地区电网的所有发电机模型不变,外围其他区域电网全部发电机均采用经典二阶模型,负荷采用 100%恒阻抗,通过 PSASP程序中"逆迭代转 Rayleigh熵迭代法"搜索部分特征值,求出与该地区电网相关的主导低频振荡模式,分析其频率、参与振荡发电机组的模态及相关因子的大小,找到对主振模式影响较大的关键机组,揭示不稳定的振源。

(2)假设在相关因子大的强相关发电机出口变压器高压侧短路(1.0 s故障、1.02 s故障切除)来模拟小扰动,在相关机组功角曲线上检测所含低频振荡模式,与式(1)中结果相互验证,并求得该模式真实的阻尼值。另一方面,还能检测到由于"逆迭代转 Rayleigh熵迭代法"搜索部分特征值而漏掉的那部分特征根,尤其是频率特别低的大区域间振荡模式。

3 算例分析

3.1 4机算例验证发电机模型对振荡模式的影响

4机 11节点系统如图 1所示,系统参数及正常情况下的运行工况参考文献[6]。下面分 6种情况研究不同发电机模型、励磁调压系统、负荷模型对低频振荡模式的影响:①发电机都采用经典二阶模型,阻尼系数 D取 0.01;②发电机都采用 3型三绕组模型,不计励磁系统;③发电机均配直流快速励磁;④发电机均配高增益可控硅励磁;⑤退出调压器运行;⑥感应电动机负荷比例由 50%降到 30%。

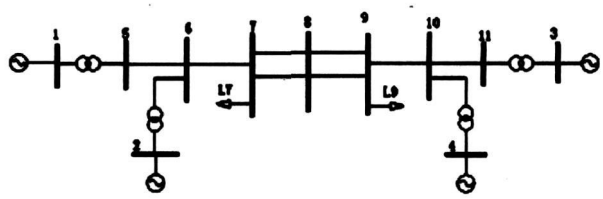

图 1 4机两区域系统示意图

针对上述 6种情况,利用 PSASP进行小干扰稳定计算,求得主振模式的频率、阻尼、模态图及参与因子。表 1给出了不同发电机模型下 3个振荡模式的阻尼和频率,其中模式 1为区域间振荡模式,模式 2、3为本地振荡模式。

分析表 1:发电机采用模型不同时,系统 3个主要振荡模式的振荡频率变化不大,只是阻尼有较大变化,尤其是本地振荡模式的阻尼,励磁系统影响区域间振荡的方式取决于励磁机的类型和位置以及负荷的特点。区域间振荡的特性与局部振荡极其不同,感应电动机负荷特性对区域间模式稳定性有很大影响。

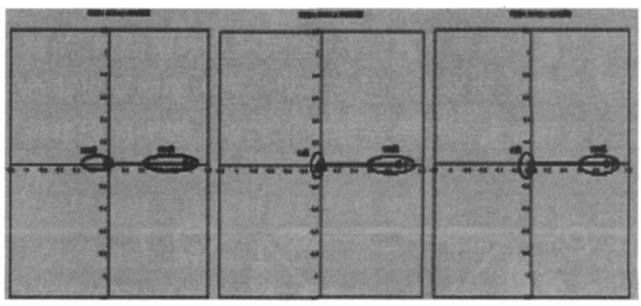

图 2 不同发电机模型区域间振荡模式的模态图

看模态图 2,发电机采用不同模型时,本地模式参与发电机组以及振荡机组的分群完全相同,而区域间模式的振荡模态也大致相同,仅个别机组振荡方位略有改变。

3.2 大区域互联后全国联网系统区域间的低频振荡分析

文中仿真计算全国联网系统采用的是全国联网后的系统,由华北、东北、华中、川渝和山东电网组成,

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 元件模型对振荡模式的影响

模 式	经典二阶		3阶无励磁		直流励磁		快速励磁		退调压器		感应电机负荷	
	ζ/%	f/Hz	ζ/%	f/Hz	ζ/%	f/Hz	ζ/%	f/Hz	ζ/%	f/Hz	ζ/%	f/Hz
1	4.5	0.536	9.0	0.537	9.4	0.538	12.1	0.513	9.0	0.537	11.5	0.517
2	2.3	0.994	6.6	0.995	6.6	0.995	27.2	0.990	6.6	0.995	6.7	0.995
3	2.4	1.028	6.7	1.028	6.7	1.029	29.0	1.022	6.7	1.029	6.8	1.028

总计 892台发电机,系统阶数达两万余阶。因为大规模电力系统区域间振荡模式的特性是参与振荡机群繁多 (数百台),涉及多个的区域性电网,相关因子大小接近且多处于同一数量级,所以即使外围电网经过适当降阶化简,大区域间振荡模式仍然不易求解。下面采用所提出的方法。

第一步,先不考虑振荡模式的阻尼水平,所有发电机用经典二阶模型模拟,利用 PSASP小干扰计算特征值,该方法寻找区域间振荡模式快速、简单,但衰减阻尼比不准确且容易出现负阻尼。表 2列出了区域间低频振荡模式,模态见图 3。

表 2 采用经典二阶模型时区域间振荡模式

模式	实部	虚部	频率	阻尼	机电回路相关比
1	0.011 459	1.143 080	0.181 927	-1.002 4	65.109 1
2	0.000 146	2.244 858	0.357 280	-0.006 5	167.874 0
3	0.004 420	2.580 488	0.410 697	-0.171 3	467.536 0
4	0.000 009	3.286 303	0.523 031	-0.000 3	166 809 0

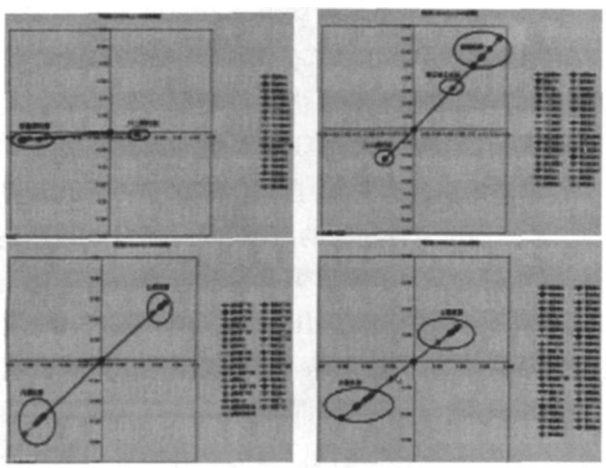

图 3 区域间振荡模式模态图

由图 3看出:模式 1为川二滩 6台机组相对晋、鲁、蒙机群振荡,振荡方位相反;模式 2为川二滩 6台机组相对鄂三峡左机组及湖南机群逆反振荡;模式 3为山东机群相对内蒙机群振荡;模式 4为山西机群相对内蒙机群振荡。这些模式振型明显,皆为一个区域多台机组相对另一区域多台发电机振荡,两个分群中参与机组众多、参与性相当,应该是主导系统稳定特性的大区域间低频振荡模式。

第二步,发电机采用详细模型,在各个模式强相关的发电机出口变压器高压侧短路用来激发这些区域间振荡模式,在相对振荡的机群中找容量一大一小的一对机组,输出其相对功角曲线。然后运用 Prony拟合和 EMD分解 —小波变换检测曲线包含的主要模式,其中模式 1和 2曲线拟和结果见图 4,验证这些模式频率和阻尼于表 3中。

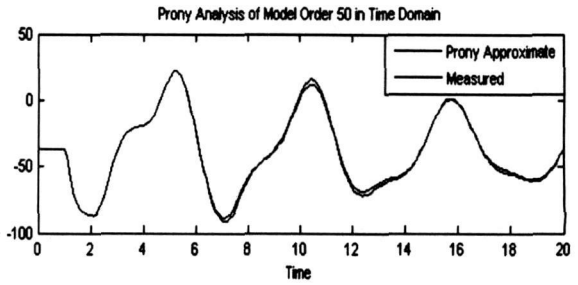

图 4 川二滩 01号晋武电 G1功角曲线

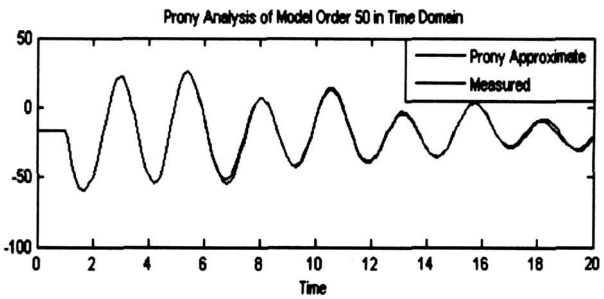

图 5 川二滩 01号—湘潭 B03功角曲线

表 3 δ曲线检测所得主要振荡模式

模式	幅值	虚部	频率	阻尼	能量级
1	63.08	-0.046	0.182	0.041	90620
2	23.09	-0.243	0.351	0.109	2815
3	10.99	-0.0712	0.397	0.0285	2013
4	1.67	-0.1502	0.545	0.0439	23.62

对比表 2、表 3可知:在经典二阶模型下所求得系统的区域间振荡模式确实存在,小干扰计算所得模式与功角曲线检测结果相比,频率相当吻合,但全网数据、发电机均采用详细模型时功角曲线检测模式的阻尼大于经典二阶模型的结果。

文中所得模式 1的频率、参与振荡机组分群与振荡相位、阻尼均与文献 [7]殊途同归,从而验证了该方法的有效性,且阻尼更加贴近实际电网真实阻尼,

(下转第 82页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

扰乱了供用电秩序。为防窃电,供电企业采取了加强人力检查,电能表计中增设防窃电措施等各种技术手段,这在一定程度上杜绝了一些窃电,但苦于缺乏第一时间的窃电依据,造成窃电行为时有发生。通过本方案,可以第一时间掌握用户的窃电数据,并通过历史数据比对,可以有效地分析出一些难以发现的窃电行为和计量故障。

2.3.3 预付费

当前,中国各电力公司客户拖欠电费、违章用电现象比较严重,已引起有关部门的高度重视。如何采用科学的管理方法和手段来解决目前存在的问题,有效降低电力公司的经营风险,保护企业合法利益,为电力事业可持续发展创造有利条件,是摆在面前迫切需要解决的问题。通过本方案的实施,可以及时分析出居民用户的实时用电费用,根据大用户的各种表计分析计算出大用户的实时用电费用,从而实现预付费功能。

3 结束语

利用 GPRS、CDMA以及 ZigBee技术等现代通信技术,组建 10 kV配电网络及低压台区电网的无线数据通信平台,实现用电需求侧的全面监测。相关电网数据通过该无线网络平台实时传输,为电力系统各种实时应用奠定基础,从而提高供电企业的现代化管理水平。

参考文献

[1] ZigBee WEB. ZigBee Protocol Specification. http://www.zigbee.org. 2006.
[2] 李晋. 防窃电技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
[3] 王士政. 电网调度自动化与配网自动化技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
[4] 钟章队. GPRS通用分组无线电业务 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
[5] 窦中兆,等. CDMA无线通信原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[6] 国家电力公司著. 国家电力公司电力网电能损耗管理规定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
[7] IEEE WEB. IEEE 802.15.4 Specification. http://www.ieee.org. 2006.

(收稿日期: 2010—01—10)

(上接第 23页)

大于文献 [7]中的结果 0.029,原因是此方法是在全网原数据、发电机模型未经任何简化时求得,仿真模型更精细,更能充分显示系统的动态本质。

4 结 论

大规模区域互联电网低频振荡分析,最重要、最困难的工作是区域间主导低频振荡模式的求解问题。四机两区域算例研究表明,低频振荡模式由系统的固有结构特性和运行方式决定,发电机模型的详细与简单不改变振荡模式的频率,励磁系统模型和负荷特性对阻尼影响较大,并且因其移相作用可能引起区域间模式个别机组的振荡相位少许改变,但本地模式模态基本不变。因此,大规模电力系统低频振荡分析可采用文中思路,先在经典二阶模型、负荷恒阻抗模型下得到区域间低频振荡模式的频率、强相关机组、模态等基本特征信息。然后,采用详细模型,在强相关机组的暂态稳定功角曲线上实施检测,获得合理真实阻尼以及时域特性。大区联网后全国系统低频振荡分析验证了该方法的有效性和准确性。

参考文献

[1] 周双喜,苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 1—8.
[2] 邓集祥,涂 进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
[3] 白洋,邓集祥. 区域电网低频振荡模式的检测方法 [J]. 四川电力技术, 2009, 32(5): 71—74.
[4] 董航, 刘涤尘, 邹江峰. 基于 prony算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97—100.
[5] 邓集祥,欧小高,姚天亮. 基于小波能量系数的主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报, 2009, (8): 141—146.
[6] P. Kundur. Power system stability and control [M]. McGraw—Hill Inc. New York, 1994.
[7] 邓集祥,贺建明,姚天亮,等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78—83.

作者简介:

姚天亮 (1979—),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行分析与稳定控制。

(收稿日期: 2010—02—10)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

真空开关操作过电压统计分析研究

张 伟[1],胡 蓉[2],杜 颢[3],王 姝[3],李建明[4]
(1.西华大学电气信息学院,四川 成都 610039; 2.四川电力设计咨询有限公司,四川 成都 610016;
3.成都电业局,四川 成都 610021; 4.四川电力试验研究院,四川 成都 610072)

摘 要:配电网中经常因操作或短路而产生过电压,从而危害电气设备的绝缘安全。以 35 kV配电母线上的过电压监测数据为例,运用数理统计方法对三相对地操作过电压进行统计计算分析,得出操作过电压幅值倍数的概率密度分布。为设备绝缘配合设计提供有效地依据,具有一定工程意义。

关键词:操作过电压;统计分析;绝缘配合

Abstract: Overvoltage is often generated by the operation or short-circuit fault in distribution network, thereby endangering the insulation safety of electrical equipment. Taking the overvoltage data monitored in 35 kV distribution bus for example, the theoretical analyses and calculations for three-phase switching overvoltage to earth are carried out using mathematical statistics, and the probability density distribution of switching overvoltage amplitude multiple is obtained, which can provide a effective basis for insulation coordination design for the equipment with a certain engineering significance.

Key words: switching overvoltage; statistic analysis; insulation coordination
中图分类号:TM864 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0028-03

操作过电压是由系统故障或开关操作等引起的过渡过程过电压。由于操作,暂态过程使电力系统中的电容、电感等储能元件的工作状态发生了变化。电感元件存储的磁场能会在转化为电场能存储于电容元件中,电容元件存储的电场能也会在某一瞬间转变为磁能存储于电感元件中,这种情况下会产生数倍于电源电压的过渡过程过电压。为了保证电力系统的安全、可靠、经济运行,迫切需要对暂态过电压进行监测与分析研究。随着过电压研究工作的深入,绝缘配合方法的改进,测试手段更先进,所涉及到的过电压参数越来越多,人们更加重视过电压统计规律分析研究。

以某变电站的 35 kV配电母线上用 TR2000在线监测装置监测的数据为例,通过理论分析和统计计算,得出操作过电压的分布情况,进一步得出了操作过电压对地幅值倍数的概率分布,具有一定的工程意义。

1 数理统计在过电压技术中的应用

数理统计在高电压技术领域应用很广,使用统计方法来分析过电压是一个较新的课题。数理统计研究结合操作过电压的特点建立数学模型,可根据数据样本,计算相对地过电压,持续时间等有关变量的样本统计值,并进行分布函数的假设检验。

1.1 收集和整理数据

统计数据来源于直接或间接的现场测试和进行实验模拟。而通过现场测试获得大量的数据是很宝贵的,可用于客观事物进行深入分析。由于测试数据的波动性,只有用科学的方法加以整理之后,才能发现其中的规律性。

1.2 数据统计推断

采取抽样检验的方法,通过样本测定值来了解样本分布,并由此去推断总体规律。为了使这种统计推断的结论正确可靠,应满足以下 3个条件:保证所抽样本对总体有充分的代表性;采用科学的抽样方法进行抽样;在所获样本资料的基础上,运用正确的方法进行统计推断。

1.3 假设检验

假设检验在分析测试数据统计分析中有着广泛的应用,可用来检验与判别测试数据中的异常值检验平均值、判断因素效应与系统误差、判断测试方法与测试结果的精度、检验测定值分布类型等。假设检验有两种范畴,一种是参数假设检验,另一种是非参数假设检验。总而言之,参数假设必须假定总体分布,对分布中的某种参数检验。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 真空开关操作过电压统计分析

2.1 数据采集

本次研究的过电压数据是 2009年 1月在攀枝花某变电站所采集的一段时间的数据。该企业的进线电压等级为 35 kV。使用在线监测装置只对电力系统三相中的 A、C两相进行了实时监测记录。出于保护相关的电气设备,过电压在线监测装置的记录倍率设置得比较小,则其记录的数据较多。过电压在线装置是以系统额定电压作为计算过电压倍数的标准。将记录的 1月份中 1周的所有过电压数据视为一个总体,从其中任意选择出 30组数据作为样本进行分析。样本如表 1所示。

表 1 2009年 1月份过电压数据

序号	日期/月·日	时间/h:min:s	过电压幅值/kV	过电压倍数
1	1.7	18:47:34	39.672	1.388
2	1.8	01:37:55	41.723	1.460
3	1.8	05:10:20	39.437	1.380
4	1.8	05:27:21	52.583	1.840
5	1.8	09:49:55	75.444	2.640
6	1.8	10:24:38	64.298	2.250
7	1.8	11:09:13	52.583	1.840
8	1.8	11:53:54	64.298	2.250
9	1.8	14:13:21	53.154	1.860
10	1.8	17:58:23	42.866	1.500
11	1.8	20:28:57	45.724	1.600
12	1.8	21:56:54	74.585	2.610
13	1.9	09:41:28	66.612	2.310
14	1.9	10:32:57	60.011	2.100
15	1.9	10:56:11	53.726	1.880
16	1.9	14:12:03	82.301	2.880
17	1.10	03:56:27	46.867	1.640
18	1.10	03:57:16	74.585	2.610
19	1.10	06:41:25	63.440	2.220
20	1.10	08:41:47	54.869	1.920
21	1.10	09:28:54	54.297	1.900
22	1.10	10:28:20	53.726	1.880
23	1.10	11:13:37	48.582	1.700
24	1.10	11:41:13	40.580	1.420
25	1.11	03:01:22	53.726	1.880
26	1.11	06:31:30	57.430	2.010
27	1.11	15:38:09	66.868	2.130
28	1.11	19:08:31	58.296	2.040
29	1.11	21:42:52	35.436	1.240
30	1.12	02:33:36	48.010	1.680

2.2 数据的频数与频率分布

为了便于分析,确定样本组距数为 k=5,取 a=1.235, b=2.885,全距 L=2.885−1.235=1.650。实际数据的全距为 R=2.880−1.240=1.640,其等组距为$\triangle t_i$=1.650/5=0.330,即第 i个子区间的组距(宽度)为 0.330,组中值为 $t_i=t_{i-1}+t_i/2=1, 2, 3, 4, 5$。从而可以得出样本落入各个子区间的频数 m_i和频率 $f_i=m_i/m$,其中 $m=\sum_{i=1}^{k}m_i$, $1=\sum_{i=1}^{k}f_i=\sum_{i=1}^{k}m_i/m$。

过电压倍数频数统计样本频数及频率分布如表 2所示。

表 2 频数和频率分布表

序号	子区间	组中值	频数	频率/%
1	(1.235, 1.565]	1.400	6	20
2	(1.565, 1.895]	1.730	10	33.33
3	(1.895, 2.225]	2.060	7	23.33
4	(2.225, 2.555]	2.390	3	10
5	(2.555, 2.885]	2.720	4	13.34

由表 2数据可以得到其频数直方图和频数折线图,如图 1所示。

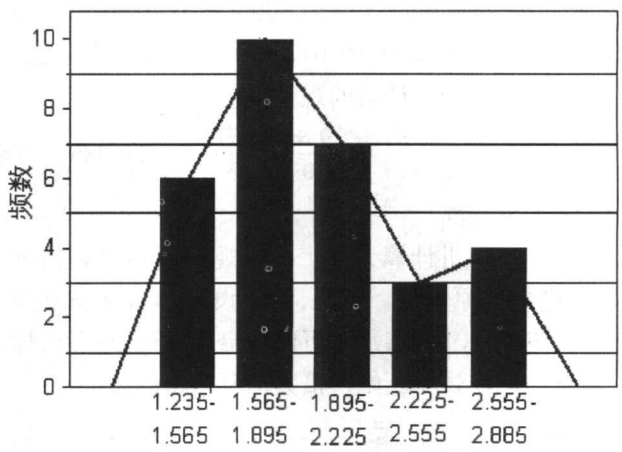

图 1 频数直方图及频数折线图

样本均值反映的是全部数据的集中趋势,本次研究的样本的样本均值为 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=1.935$。方差能够准确反映数据的离散程度,则总体方差为:$\delta^2=\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2/N=0.1643$;;样本方差为 $S^2=\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2/(n-1)=0.1699$。

2.3 假设检验

由上面的频数直方图及频数折线图可直观地看出,操作过电压倍数频率统计分布近似服从正态分布。假设为过电压数据频数总体 $X\sim N(\mu, \delta^2)$,其中参数 μ和 δ^2均未知, x_1、x_2、x_3、x_4、x_5是来自总体 X的简单随机样本。为了验证这一假设,采用使用 x^2检

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验法进行检验,其为关于方差 δ^2 的假设检验。

① 原假设和备择假设

$H_0: \delta^2 = \delta_0^2$, $H_1: \delta^2 \neq \delta_0^2$,其中 $\delta_0^2 = 0.1643$。

② 选取检验统计量

当原假设为真时,检验统计量为

$$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\delta_0^2} \sim \chi^2(n-1)$$,其中 $S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$ 为样本方差, $S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 = \frac{4.9275}{29} = 0.1699$。

③确定拒绝域

给定显著水平 $\alpha(\alpha=0.05)$,使

$$P\left(\frac{(n-1)S^2}{\delta_0^2} \geqslant \chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)\right) = \frac{\alpha}{2};$$

$$P\left(\frac{(n-1)S^2}{\delta_0^2} \leqslant \chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1)\right) = \frac{\alpha}{2}$$

从 χ^2 分布表查出临界值为 $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$与 $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1)$的值,得到

$$\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) = \chi^2_{0.025}(29) = 45.722$$

$$\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) = \chi^2_{0.975}(29) = 16.047$$

于是拒绝域为 $(0, 16.047)$或 $(45.722, +\infty)$。

④计算检验统计量的观察值

$$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\delta_0^2} = \frac{29 \times 0.1699}{0.1643} = 29.985$$

⑤做出判断

由上述分析计算,得出 χ^2 的观察值不落在拒绝域中,则接受原假设。于是,原假设总体服从正态分布 $N(1.935, 0.164)$,从而可以得出总体概率密度,即三相对地操作过电压幅值倍数的概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.405} e^{\frac{(x-1.935)^2}{2\times 0.405^2}}$$

对于 220 kV及以下系统,通常电气设备的绝缘结构设计允许承受 2～3倍过电压,过电压倍数统计的样本中过电压幅值最大倍数为 2.880,其平均倍数为 1.935,虽在电气设备的承受范围内,但过多操作过电压的存在,时间一长也将会对电气设备的绝缘产生累积效应而逐渐消弱其绝缘水平。

变电站配电网中电气设备众多,对电气设备的操作时常发生,频繁的操作而产生的过电压时刻危害着变电站中的相关电气设备。

3 过电压统计对绝缘配合的作用

采用统计法作为绝缘配合的前提,是充分掌握各种过电压和各种绝缘电气强度的统计特性 (概率密度、分布函数等)。利用统计法进行绝缘配合时,安全裕度不再是一个带有随意性的量值,而是一个与绝缘故障率相联系的变数。在实际中采用统计法来进行绝缘配合,是相当复杂和困难的。简易的统计法是利用有关参数的概率统计特性,但沿用惯用法计算程序的一种混合型绝缘配合方法,这对于评估系统的运行可靠性是重要、常用的。

电力系统的运行可靠性主要由停电次数及停电时间来衡量。造成电力系统故障、停电的原因主要为电压升高及电压下降两大类,因此除了提高电气设备的绝缘水平外,还要尽可能限制电力系统出现过电压。

4 结 论

通过分析,该变电站在 2009年 1月份中的操作过电压倍数服从正态分布 $N(1.935, 0.164)$。过电压倍数处在 $(1.565, 1.895]$区间的频数为 33.33%,处在 $(1.895, 2.225]$区间的频数为 23.33%。由此可见,该变电站操作过电压倍数大部分 处 在 $(1.565, 2.225]$区间内。按统计结果分布,建议该变电站操作过电压倍数不应超过 2.0倍。否则会对电气设备绝缘产生累积效应而逐渐消弱其绝缘水平。

对变电站中操作过电压的限制可以选用性能良好的氧化锌避雷器 (MOA)和 RC保护装置。不同场合可以根据实际情况选用 MOA或 RC的不同保护接线方式。合理选择和使用氧化锌避雷器,将会对变电站电气设备起到很好的保护作用,从而会提高变电站的安全运行水平。

参考文献

[1] 周泽存,沈其工,方瑜,等.高电压技术 [M].北京:中国电力出版社, 2007.

[2] 杨保初,刘晓波,戴玉松. 高电压技术 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 2004.

[3] 滕素珍, 冯敬海. 数理统计学 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.

[4] 陈维贤.内部过电压基础 [M].北京:水利水电出版社, 1981.

[5] 方瑜. 配电网过电压 [M].北京: 水利电力出版社, 1994.

[6] 许颖, 徐士珩. 交流电力系统过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京:中国电力出版社, 2006.

[7] K. C. Lee, K. P. Poon. Statistical Switching Overvoltage Analysis of The First B. C. Hydro Phase Shifting Transformerormer Using The Electroma－gnetic Transients Program [J]. IEEE, 1990.

(收稿日期: 2009－11－10)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响研究

随新鲜,王 倩,杨亚强,张婷婷
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:主要研究了分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响,考虑当前配电网元件和负荷原始参数的不确定性,采用区间算法计算分布式电源并网运行时的可靠性指标。以一个简单的配电网为模型,得出含 DG的配电网可靠性指标的计算公式。以 IEEE—RBTS Bus 6测试系统为算例,分别比较分布式电源的未接入、看成额定容量的发电机以及有多个运行状态的发电机组等情况,来分析不同模型对配电网可靠性的影响,并验证分布式发电并网运行在改善电网可靠性方面的作用。

关键词:区间算法;分布式电源;并网运行;可靠性评估

Abstract: The impact of distributed generation (DG) parallel operation on the reliability of distribution network is studied. Considering the uncertainty of original parameters in both components and loads of distribution system, the indices for the reliability evaluation of distribution network with DG parallel operation based on the interval computation are calculated. Taking a simple distribution system for model, the formulas for the reliability evaluation of distribution network with DG are obtained. Taking RBTS 6—bus distribution system for example, the impact of different model on the reliability of distribution network is analyzed by comparing with the distributed generation which is not switching in, the generators treated as having rated capacity as well as the generators with multiple operating conditions, thus the effect of DG parallel operation in improving the reliability of distribution network is verified.

Key words: interval algorithm; distributed generation (DG); parallel operation; reliability evaluation
中图分类号:TM732 **文献标志码**:A **文章编号**:1003—6954(2010)02—0031—03

0 引 言

目前,全球范围内的分布式发电技术发展速度很快,分布式发电在电能生产中所占比重不断增加,对配电网结构与运行的影响也越来越大[1]。在研究中发现,如果 DG(distributed generation)仅作为备用电源则可以提高系统供电的可靠性。文献[2]指出分布式电源作为馈线的备用电源能大大提高配电网运行的可靠性。然而,大量 DG与电网并网运行,若相互协调不好,则可能降低系统的可靠性。文献[3]指出在系统中出现扰动时,由于 DG的不确定性,也可能降低系统的整体可靠性。目前,实际系统一旦出现扰动,通常会切除所有的 DG使系统恢复到原来的结构,但这并不是最佳解决方案。因此,研究分析 DG并入配电网后对可靠性的影响具有重要意义。

考虑当前配电网元件和负荷原始参数的不确定性,采用了区间算法来计算分布式电源与电网并网运行时的可靠性指标,并分析不同的分布式电源模型对配电网可靠性带来的影响。

1 基于区间算法的配电网可靠性评估

1.1 可靠性区间运算

若给定的区间数均

$[x]=[\underline{x},\overline{x}]$, $[y]=[\underline{y},\overline{y}]$,且 $\underline{x}$、$\underline{y}$、$\overline{x}$、$\overline{y}$均大于 0,则

$[x]+[y]=[\underline{x}+\underline{y},\ \overline{x}+\overline{y}]$,

$[x]-[y]=[\underline{x}-\overline{y},\ \overline{x}-\underline{y}]$, $[x]\cdot[y]=[\underline{xy},\ \overline{x}\,\overline{y}]$,

$[x]/[y]=[\underline{x},\overline{x}]\cdot[1/\overline{y},\ 1/\underline{y}]=[\underline{x}/\overline{y},\ \overline{x}/\underline{y}]$[4]。

设各负荷点 i的可靠性指标:平均故障率 $[\lambda_i]$和年平均停运时间 $[U_i]$。而负荷点 i的平均停运持续时间 $[\gamma_i]$可由反演公式求得。

$$[\gamma_i]=\Phi([\lambda_i],[U_i])$$

此时, $\Phi([\lambda_i],[U_i])=[\underline{U_i}/\underline{\lambda_i},\ \overline{U_i}/\overline{\lambda_i}]$

系统的平均故障率为 $[\lambda_S]=\sum[\lambda_i]$,系统的年平均停运时间为 $[U_S]=\sum[U_i^i]$,则系统的平均停运持续时间为 $[\gamma_S]=\Phi^i([\lambda_S],[U_S])=[\underline{U_S}/\underline{\lambda_S},\ \overline{U_S}/\overline{\lambda_S}]$。

1.2 含 DG的配电网可靠性计算模型

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一个含 DG的简单配电网如图 1所示。

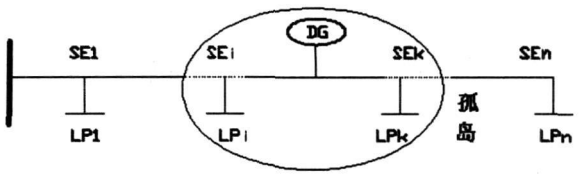

图 1 含 DG配电网的结构示意图

图 1中断路器、隔离开关及变压器等元件未画出,且其故障率均为零。对于含分布式电源系统中的一个孤岛来说,发电量并非总是满足该岛负荷的需求,系统会根据情况做出反应,切除部分负荷或者从该岛断开分布式电源。这里采用启发式孤岛划分算法使 DG迅速地最优地向配电网供电[5]。

先假设孤岛能够形成,孤岛内 DG上游侧 (DGU)的负荷 LPi问题属于 DG与供电干线的二重故障问题 (供电干线的二重故障影响小忽略不计),且负荷点所在的供电干线段发生故障,负荷点必停电,恢复供电的时间由线路故障修复时间决定;对于孤岛内 DG下游侧 (DGD)的负荷点 LPk,除了 DG与供电干线的二重故障影响外, DG与负荷点之间的供电干线段发生故障亦可导致负荷点停电。则负荷点 LPx的故障率和年平均停电时间为

$$[\lambda_{LPx}']=\begin{cases}\sum_{q=1}^{N}[\lambda_D][\lambda_q]([\gamma_D]+[\gamma_q])\\ \quad+[\lambda_x]\text{—— DGU}\\ \sum_{q=1}^{N}[\lambda_D][\lambda_q]([\gamma_D]+[\gamma_q])+\sum_{p=1}^{M}[\lambda_p][\gamma_p]\\ \quad+[\lambda_x]\text{—— DGD}\end{cases}\tag{1}$$

$$[U_{LPx}']=\begin{cases}\sum_{q=1}^{N}[\lambda_D][\lambda_q][\gamma_D][\gamma_q]\\ \quad+[\lambda_x][\gamma_x]\text{—— DGU}\\ \sum_{q=1}^{N}[\lambda_D][\lambda_q][\gamma_D][\gamma_q]+\sum_{p=1}^{M}[\lambda_p][\gamma_p]\\ \quad+[\lambda_x][\gamma_x]\text{—— DGD}\end{cases}\tag{2}$$

式中, $[\lambda_D]$, $[\gamma_D]$—— DG的故障率和故障平均修复时间;

$[\lambda_q]$, $[\gamma_q]$——处于负荷点 LPx与 DG两者前面的各条供电干线段的故障率和故障平均修复时间;

$[\lambda_p]$, $[\lambda_p]$—— DG与负荷点 LPx之间各条供电干线段的故障率和故障平均修复时间;

N, M——处于负荷点 LPx与 DG两者前面的供电干线段的条数和 DG与负荷点 LPx之间的供电干线段的条数。

由于 DG发电量并非总能满足岛内的负荷需求,需判定形成孤岛的概率。若孤岛不能形成,可按系统没有安装 DG情况分析[6]。设 LPx表示包含在 DG孤岛内的任一负荷点,则 $[\lambda_{LPx}'']$、$[U_{LPx}'']$和 $[\gamma_{LPx}'']$分别为负荷点 LPx在无 DG作用下的故障率、年平均停电时间和平均停运持续时间。

取负荷点 LPx被包含在 DG孤岛内的概率为 P_{LPx},则孤岛内负荷点的可靠性指标的计算公式如下。

$$[\lambda_{LPx}]=P_{LPx}[\lambda_{LPx}']+(1-P_{LPx})[\lambda_{LPx}''] \tag{3}$$

$$[\gamma_{LPx}]=P_{LPx}[\gamma_{LPx}']+(1-P_{LPx})[\gamma_{LPx}''] \tag{4}$$

$$[U_{LPx}]=[\lambda_{LPx}][\gamma_{LPx}] \tag{5}$$

在得到所有负荷点的可靠性指标后,系统的可靠性指标可根据文献 [7]中相应公式求出。配电网的可靠性指标主要包括:系统平均停电频率 SAIFI,系统平均停电持续时间 SAIDI,用户平均停电持续时间 CAIDI,系统平均供电可用率 ASAI,系统缺供电量 ENS。

2 算 例

以 IEEE—RBTS Bus 6测试系统[8]主馈线 F4为算例,系统结构如图 2所示。该系统一共有 30条线路、23个负荷点、23个熔断器、23个用户变压器、21个隔离开关、4个断路器, 1183个用户,总平均负荷为 4.5703 MW。在主馈线 23和 29处分别加入 1个分布式电源 DG,其最大输出功率均为 1 MW。计算过程中假设断路器和熔断器的故障率为 0,隔离开关操作时间为 0.5 h,其区间值为 [0.4, 0.6]。各馈线的故障率为 0.05次 /km·a,其区间值为 [0.04, 0.06],平均修复时间为 4 h,区间值为 [3.2, 4.8]。用户变压器的故障率为 0.015次 /台·a,其区间值为 [0.012, 0.018],平均修复时间为 30 h,区间值为 [24, 36]。分布式电源的故障率为 4次 /a,区间值为 [4.5, 5.5],平均修复时间为 50 h,区间值为 [45, 55]。

分布式电源有不同的可靠性模型。将通过分别比较分布式电源的未接入、将其看成额定容量的发电机以及随机容量发电机 (有多个运行状态的发电机)等情况,来观察不同模型对配电网可靠性的影响。

方案一假设不考虑 DG作用,先求出各负荷点的可靠性指标 (限于篇幅,此处不再列举各负荷节点的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

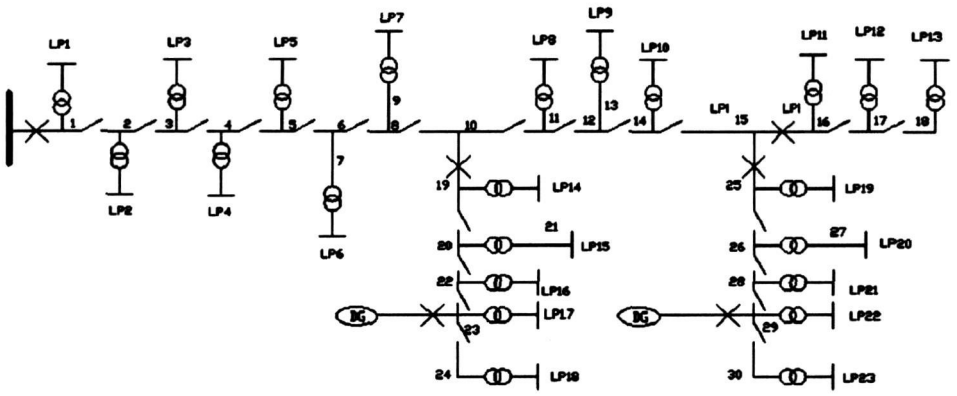

图 2 含 DG的 IEEE—RBTS Bus 6测试系统主馈线 F4的结构图

1可靠性指标),最后计算出系统的可靠性指标。如表所示。

表 1 方案一中系统的可靠性指标

系统可靠性指标	不考虑 DG作用	
	点值	区间值
SAIFI	1. 52486	[1. 21989, 1. 82980]
SAIDI	4. 20144	[2. 42643, 5. 45850]
CAIDI	2. 75530	[1. 32606, 4. 47458]
ASAI	0. 99952	[0. 99937, 0. 99972]
ENSI	22. 97671	[14. 07837, 31. 42156]

方案二将 DG看成额定容量的发电机模型来计算配电网可靠性指标。表 2列出方案二的部分负荷点可靠性指标计算结果与不考虑 DG情况进行对比。

方案三是将 DG看成随机容量的发电机组,表 3为方案二和方案三的系统可靠性指标的比较结果。

从表 1、表 2、表 3可以看出:

1)因原始输入数据的波动,其系统的可靠性指标也是一个区间范围,且包括点值所得的可靠性指标;若提高系统的整体可靠性,可以从加强主馈线、变压器等基础元件的可靠性入手。

2)加入分布式电源仅对孤岛内的负荷点有影响,对孤岛外负荷点没有任何作用,从而可知 DG的合理选址对提高系统的整体性能起着重要作用。

3)将 DG看成额定容量的发电机 (如汽轮机、燃料电池等)并网运行时,系统可靠性指标明显提高,从而验证了分布式发电并网运行时在改善电网可靠性方面起着积极的作用。而将 DG看成随机容量的发电机组时 (如风力发电或光伏发电),系统的可靠性指标相比方案二有所下降,这是由于随机电源的不稳定性可能会造成孤岛形成概率的减小,使得系统整体性能降低,论证了含 DG的配电网可靠性计算模型的合理性。

表 2 方案二部分负荷点的可靠性指标

部 分 负荷点	λ		μ	
	无 DG	方案二	无 DG	方案二
1	[1. 0320, 1. 5480]	[1. 0320, 1. 5480]	[1. 0096, 2. 2716]	[1. 0096, 2. 2716]
7	[1. 0640, 1. 5960]	[1. 0640, 1. 5960]	[2. 3104, 5. 1984]	[2. 3104, 5. 1984]
14	[1. 5640, 2. 3460]	[1. 5783, 2. 3784]	[2. 8800, 6. 4800]	[1. 3098, 2. 9944]
15	[1. 5960, 2. 3940]	[1. 6134, 2. 4336]	[3. 1616, 7. 1136]	[1. 6008, 3. 6598]
18	[1. 5640, 2. 3460]	[1. 5883, 2. 4012]	[4. 0112, 9. 0252]	[2. 4709, 5. 6401]
19	[1. 5480, 2. 3220]	[1. 5733, 2. 3794]	[4. 0720, 9. 1620]	[1. 2915, 2. 9896]
20	[1. 5780, 2. 3670]	[1. 6060, 2. 4308]	[4. 4480, 10. 0080]	[1. 6757, 3. 8634]

表 3 方案二与方案三的系统的可靠性指标对比

系统可靠性指标	方案二		方案三	
	点值	区间值	点值	区间值
SAIFI	1. 53428	[1. 22595, 1. 84357]	1. 53237	[1. 23552, 1. 831493]
SAIDI	3. 303767	[1. 84767, 4. 17640]	3. 48330	[1. 98811, 4. 25829]
CAIDI	2. 153301	[1. 00222, 3. 440667]	2. 27311	[1. 08551, 3. 44655]
ASAI	0. 99962	[0. 99952, 0. 99979]	0. 99960	[0. 99951, 0. 99977]
ENSI	16. 33038	[9. 84219, 22. 05745]	17. 65965	[10. 65878, 23. 83483]

(下转第 52页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线稳定评估、市场环境下的输电阻塞问题进行研究并提出初步的解决思路。

基于人工智能的在线稳定评估方法具有在线评估速度快、生成的规则解释性强等优点。新方法可以提供运行调度人员重点监视的潮流量,根据潮流量的大小实时地掌握当前运行方式下电网的稳定水平,生成的规则可以为运行调度人员通过改变运行方式来提高系统的稳定性提供直接的理论依据,但由于该方法还只处于探索起步阶段,仍存在大量技术问题亟待解决。

指出输电阻塞是影响市场环境下电网安全的重要环节,如何完善相关的市场机制,使得电力市场的设计和运行能为电网安全提供更可靠的保障。

参考文献

[1] 管霖,曹绍杰.基于人工智能的大系统分层在线暂态稳定评估 [J].电力系统自动化. 2000, 24(21): 23—26.

[2] 管霖,王同文,唐宗顺.电网安全监测的智能化关键特征识别及稳定分区算法 [J].电力系统自动化, 2006, 30(21): 22—27.

[3] 李军,刘艳,顾雪平.基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用 [J].电力系统自动化, 2005, 29(8): 26—31.

[4] 王同文,管霖,章小强,等.基于扩展 k阶近邻法的电力系统稳定评估新算法 [J].电力系统自动化, 2008, 32(3): 18—21.

[5] 王皓,孙宏斌,张伯明,等.基于混合互信息的特征选择方法及其在静态电压稳定评估中的应用 [J].中国电机工程学报, 2006, 26(7): 77—81.

[6] 于之虹,郭志忠.改进主成分分析法用于暂态稳定评估的输入特征选择 [J].电力系统自动化设备, 2003, 23(8): 17—21.

[7] 于之虹,郭志忠.遗传算法在暂态稳定评估输入特征选择中的应用 [J].继电器, 2004, 32(1): 16—20.

[8] 王同文,管霖.基于模式发现的电力系统稳定评估和规则提取 [J].中国电机工程学报, 2007, 27(19): 25—31.

[9] 许涛,贺仁睦,王鹏,等.基于统计学习理论的电力系统暂态稳定评估 [J].中国电机工程学报, 2003, 23(11): 51—55.

[10] 冯天晶,杨光. 电力市场的输电阻塞管理方案研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 106—108.

[11] 马进,宋永华,卢强,等,开放电力市场环境下的动态阻塞管理 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 23—28.

[12] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰. 关于输电阻塞及其管理的评述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 101—107.

[13] 柯进,管霖. 电力市场下的输电阻塞管理技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 20—25.

[14] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等. 输电规划方法的评述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97—101.

(收稿日期: 2009—12—20)

(上接第 33页)

3 结 语

分布式发电并网运行是智能电网发展的必然趋势。正确考虑不同分布式电源的可靠性模型,合理地对分布式电源选址定容,可以有效地提高配电网供电可靠性,从而保证分布式发电与传统发电相结合的配电系统健康有序的运行与发展。

以上采用了区间算法对配电网在元件及负荷原始参数不确定因素时进行了可靠性评估,使得计算结果更接近工程实际。

参考文献

[1] Mukesh Nagpal Frank Plumptre Richard Fulton et al Dispersed Generation Interconnection Utility Perspective [J]. IEEE Transactionsion Industry Applications Vol 42, No 3, May/June 2006.

[2] 钱科军,袁越, ZHOU Cheng—ke 等.分布式发电对配电网可靠性的影响研究 [J].电网技术, 2008, 32(11): 74—78.

[3] 王赛一.分布式电源对配电系统的影响 [J].上海电力, 2006, 19(5): 515—518.

[4] 张鹏,王守相.大规模配电系统可靠性评估的区间算法 [J].中国电机工程学报, 2004, 24(3): 79—84.

[5] 易新,陆于平.分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法 [J].电网技术, 2006, 30(7): 50—54.

[6] 王守相,王成山.现代配电系统分析 [M].北京:高等教育出版社, 2007.

[7] 郭永基.电力系统可靠性分析 [M].北京:清华大学出版社, 2003.

[8] Allan R N, Billinton R. A Reliability Test System for Educational Purposes—Basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems 1991, 6(2): 813—821.

[9] 施伟国,宋平,刘传铨.计及分布式电源的配电网供电可靠性研究 [J].华东电力, 2007, 35(7): 37—41.

(收稿日期: 2009—08—02)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

雷电回击模型在雷电电磁场计算中的应用分析

蒋宝忠,滕 欢
(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:雷电回击模型是研究分析雷电产生电磁场特性的重要环节,介绍了雷电回击模型的假设条件、分类方法以及常用模型构建的物理思想和数学表达式,分析了两类模型的内在联系、几种雷电回击电流波形曲线和 DU模型中部分参数对电磁场计算的影响,并为今后雷电回击模型的研究建立提出了建议。

关键词:雷电;回击;模型;通道;电磁场

Abstract: The lightning return stroke model is very important for studying and analyzing the characteristics of lightning electromagnetic fields. The assumption and classifying methods of lightning return stroke models are introduced as well as the mathematical expression of commonly used models. The intrinsic link between two types of models, several current waveform curve of lighting return stroke and the impact of some parameters of DU model on the calculation of lightning electromagnetic fields are all analyzed. Furthermore, the suggestions on research of lightning return stroke models are put forward.

Key words: lightning; return stroke; model; channel; electromagnetic field
中图分类号:TM854 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0038-04

0 引 言

随着智能电网在中国的推广,以特高压电网为骨干网架的逐步形成,雷电等自然灾害对高压架空输电线路的侵害概率也大大增加,输电线路和电气设备受雷电直接或间接效应的威胁严重,其危害越来越引起人们的重视。为了保护电气设施,提升电网的综合防护能力,国内外学者加大了对雷电电磁辐射场特性的研究。雷电回击模型一直是进行雷电理论研究的重要环节,对精确分析雷电产生的电磁辐射场具有重要意义。自 20世纪 40年代 Bruce和 Golde首次提出雷电回击模型以来,在雷电研究者的不断探索下,现对雷电回击模型的研究及其在电磁场计算中的应用已取得较大的进步。

1 雷电回击模型的发展与现状

1.1 建立雷电回击模型的假设条件

工程应用中大多数雷电回击电流模型是在下列条件下建立的:①雷电回击电流模型多是针对第一回击建立,因为雷电第一回击是引起雷电过电压的主要原因;②雷电回击通道是垂直于地面的理想化传输线;③不考虑放电通道分支;④大地是理想的平面导体;⑤回击高度低于回击波前。

1.2 雷电回击模型的分类及数学表达式

自 1941年 BG模型出现以后,相继出现了各种工程模型,这些模型具有不同的特点和应用范围,总的来说主要分为两大类,即传输线(TL)类型和传输电流源(TCS)类型,每类中的各种雷击模型都在各自领域内不断地发展。

1.2.1 传输线(Transmission Line)类型

传输线模型的基本思想是将雷电回击电流看作是在放电通道的底部注入了一个特定的基电流,该电流沿着通道向上传播,形成回击电流[1]。

(1)BG模型:BG模型[2]是 1941年由 Bruce和 Golde提出。该模型是最简单的一种工程模型,认为通道电流与通道高度无关,在回击过程中,当回击高度低于回击波前时,即通道中电流一致。回击波上方通道中电流为 0。设在 t时刻,z′高度处的回击电流为 i(z′, t),基点电流为 i(0, t),v为回击波前传播速度,则回击通道电流表达式为

$$i(z', t) = i(0, t) \qquad z' \leq vt \tag{1}$$

电流幅值变化规律与基点电流模型选取有关。该模型也存在一定的局限性,它假设回击通道内各点电流一致,不随高度和时间变化,那么就要求 $v=\infty$,这显然与实际雷电回击情况不符合。

(2)TL模型:TL模型[3]是由 Uman和 Mclain提

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

出。该模型考虑了通道高度对电流的影响,但没有考虑基电流在传播过程中的失真和衰减,认为回击过程是先导从地面以电流脉冲形式传递到云端。t时刻 z′高度处的回击电流比基点电流有一个 z′/v的时间延迟。回击通道电流 i(z′, t)可用基点电流表示为

$$i(z', t) = i(0, t - z'/t) \quad z' \leq vt \qquad (2)$$

该模型的优点是能够使回击电流在回击顶端的数值为 0,实现电流连续性。不足之处在于认为通道中无转移电荷分布,只有在大地为理想导体,电场为完全辐射场时才能利用公式进行电流和电场峰值或其导数值与回击速度之间的换算。

(3)MTL模型:Nucci等对 TL模型进行了修订,把回击期间电晕电荷分布、静电荷汲出和中和考虑进模型,于 1988年提出了 MTLE模型。认为通道电流随通道高度呈指数衰减[4],引入了衰减系数 $e^{-z'/\lambda}$。回击通道电流 i(z′, t)表示为

$$i(z', t) = e^{-z'/\lambda} i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \qquad (3)$$

式中,λ是电流衰减常数,根据 Lin等人的实验数据,通常取 2 000 m。

Rakov等也对 TL模型进行了修订,提出了 MTLL模型。认为通道电流随通道高度呈线性衰减,引入了衰减系数 1-z′/H。回击通道电流 i(z′, t)表示为

$$i(z', t) = (1 - z'/H) i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \qquad (4)$$

式中,H是雷电放电通道的高度。

MTLE模型和 MTLL模型统一称为 MTL模型[5]。

(4)Lin-Standler-Uman模型:Lin-Standler-Uman模型[6]是由 Lin、Uman和 Standler于 1980年提出。该模型认为通道电流由持续电流、向上的衰减电流和光速向下运动的电晕电流组成,且某一高度 z′处到达的向下脉冲电流与该点电荷放电形成电晕电流之间是不同步的,而是存在一个指数形式、与通道高度有关的时间延时。

(5)MULS模型:Master[7]等在 Lin的模型定义基础上对回击电流中的击穿脉冲电流进行了修订,于 1981年提出了 MULS模型。认为回击通道总电流由:①回击波前向上传播引起的持续击穿脉冲电流 i_p;②云中电荷向通道放电形成的均匀电流 i_h;③回击波前与先导储存的电荷作用形成向下传播的电晕电流 i_c三部分组成。

电晕电流是回击波前到达通道中每一高度时,位于该处的微电流源电荷被接通,形成以光速向下传播的电晕电流。在 z″处的电晕电流源为

$$i_c(z', t) = \int_{z'}^{H} I_0 \exp(-z''/\lambda_c) \quad t \geq t' \qquad (5)$$
$$\{\exp[-\alpha(t - t')] - \exp[-\beta(t - t')]\} dz'$$

其中,在进行电磁场计算时取 $t \approx z''/v$, $1/\alpha$和 $1/\beta$是单个电晕电流源的双指数曲线的时间常数; I_0为每单位先导通道长度向回击通道注入的电晕电流峰值; λ_c为电晕电流高度衰减的常数。

又有学者认为脉冲电流峰值与光强峰值有类比效应,脉冲电流峰值也应随高度变化而呈指数规律变化。

$$i_p(z', t) = e^{-z'/\lambda_p} i_p(0, t - z'/v) \qquad (6)$$

虽然实践表明该模型的可靠性有很大提高,但因可变参数较多,不便于完成数值计算。

1.2.2 传输电流源 (Traveling Current Source)类型

传输电流源模型被也称为放电模型,认为雷电回击电流是由向上移动的先导和被激活的电流源向下传播形成的电晕电流构成[8],该类模型间的区别主要是表现在电晕电流模型的构建上。

(1)TCS模型:TCS模型[9]是由 Heidle于 1985年提出。认为回击波前经过通道中 z′点时,将此处电荷接入回击通道,并形成一个以光速向下运动的电流源,它到达通道底部时比在 z′处有一个 z′/c的时间延迟,根据假设得到回击通道电流为

$$i(z', t) = i(0, t + z'/v) \qquad (7)$$

该模型的不足在于电荷不能瞬时被吸收到回击波前。

(2)DU模型:DU模型[10]是由 Deindorfer和 Uman于 1990提出。认为放电时先导头和先导核心部分的电荷放电较快,而电晕层中电荷放电较慢,即回击通道内同一高度处击穿电流放电衰减时间常数 τ_{BD}比电晕电流放电衰减时间常数 τ_c小。每个电流分量随时间按指数规律变化,而延时时间常数则不随通道高度改变,每种电流成分随高度变化的表达式为

$$i(z', t) = i(0, t_h) - i(0, z'/v^*) e^{-t_e/\tau} \qquad (8)$$

式中,τ为回击过程中放电衰减时间常数。

$$v^* = v(1 + v/c)$$
$$t_e = (t - z'/v)$$
$$t_h = (t + z'/c)$$

此后又出现了 Cooray模型[11],该模型与 DU模型具有一定的相似性,Thottappillil等对 DU模型进行了修订,引入了变化的回击向上运动速度及变化的向下电荷传播速度,两个速度都是通道高度的函数。随

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后 Thottappillil和 Uman考虑了高度变化对放电时间常数的影响，对 DU模型进行了修订，建立了 VDTC模型。Moini和 Rakov等人于 2000年基于天线理论提出了一种新的 AT模型[12]，把回击通道近似成有分布阻抗的单极子天线即是一种耗损天线，认为该模型是前几种模型的折中表述，根据选取衰减函数不同，能够得到不同的模型。

这两种类型的工程模型所描述的回击电流公式的区别在于电流波的传播方向不同：传输线模型认为电流向上运动（$v=v_f$，v_f表示电流波先导的速度，v是电流波的传播速度），传输电流源模型认为电流向下运动（$v=c$）。虽然在同一种模型中电流波的传播方向可能为上也可能为下，但整个回击电流总的方向是相同的。

2 雷电回击模型的对比分析

根据上述几种工程模型，通过给定一组典型参数，进行数值计算将计算所得回击雷电流曲线与实测雷电流曲线进行对比（图 1、图 2和图 3）[4]，TL模型、MTLL模型、MTLE模型和 DU模型的电流曲线起始部分与实测曲线比较接近，但波形的后续部分与实测曲线有一定差距。TCS模型和 BG模型的电流曲线起始部分呈现一个尖峰，与实测曲线有一定差距，但后续部分与实测曲线吻合的比较好。MTL模型可以看作是 MULS模型的特殊情况。DU模型中选取适当的电晕电流和击穿电流参数，再经过离散化数值处理后得到的雷电流波形，除了波形中的一些高频成分以外，与实测电流有较好的相似性。

3 DU模型中各参数对电磁场的影响分析

3.1 放电时间常数 τ

在 Uman提出 DU模型时假设击穿电流放电时

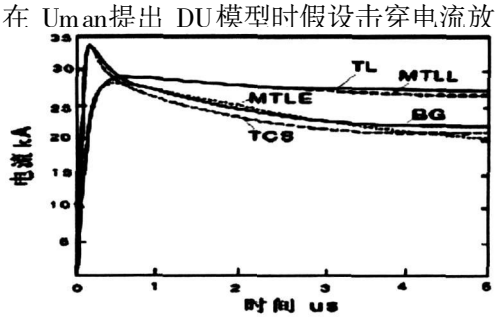

图 1 计算雷电流波形

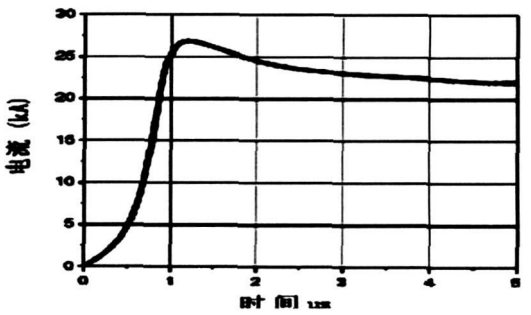

图 2 离散化 DU模型计算雷电流波形

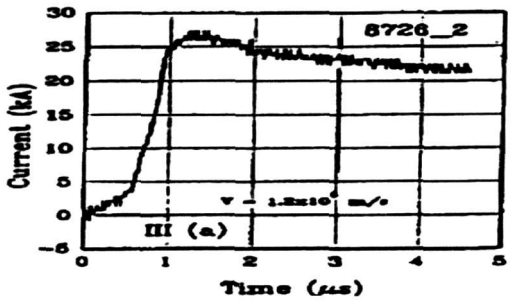

图 3 实测触发雷电流波形

间常数 τ_{BD}在 0.1至 1.2 μs之间以及电晕电流放电时间常数 τ_c在 1至 20 μs之间，文献[13]在距离回击通道水平距离 r=15 km处，计算取 $\tau_{BD}=0.6$ μs，τ_c取不同值和 $\tau_c=5$ μs τ_{BD}取不同值时的电场和磁场，发现击穿电流放电时间常数主要影响回击电磁场的起始峰值，对磁场起始峰值后的隆起幅度影响不大。随着击穿电流放电时间常数的增加电磁场起始峰值下降。而电晕电流的放电时间常数对电磁场的起始峰值和磁场起始峰值后的隆起幅度都有影响。当电晕电流的放电时间常数增大时，电磁场的起始峰值和磁场起始峰值后的隆起幅度都减小。

3.2 雷电流回击速度

一般取雷电流回击速度 $v=c/3$到 $v=c/2$，c为光速，在 r=50 m处，计算看出垂直电场的初始峰值随着回击速度的增加而下降，而切向磁场的初始峰值随着回击速度的增加而增加，但是所有波形花费的上升时间随着回击速度的增加而减少，说明对于近区场，回击速度增大后，电磁场高频分量将增加[14]。

3.3 通道高度

文献[12]中研究了雷电回击通道高度对回击电磁场的影响，得出在回击电流到达通道顶端前这段有意义的时间内，雷电回击通道高度对回击电磁场计算结果没有影响。在回击电流到达通道顶部以后，电磁场随着通道高度的减小而增加，因此，在计算雷电辐射电磁场时，应该将放电通道的高度取得足够长，以

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

保证计算的结果是有意义。

3.4 大地电容率

大地相对电容率的值一般在 3到 10之间,基于 DU模型,计算在地面场点 r=5 km处的电磁场。得出波形的初始峰值和后沿随着大地相对电容率的增加而增加,波形的上升沿变得越来越陡峭,且上升时间下降,这说明随着大地相对电容率的减少,导致镜像电流减少,从而使得高频分量在减少[15]。

文献[13]在研究中还发现雷电回击通道底部电流波形对远区电磁场过零点也有较大影响。

4 结 语

通过对以上各种雷电回击模型的比较分析不难发现:现有的雷电回击模型主要是以这两种类型为基础在进行不断的修订和发展,目的都是为了能更准确合理地计算雷电回击产生的电磁场,使其与实测参数相一致。每类模型都有不同的侧重点和应用范围,但在特定条件下也能实现模型间的相互等价,如 TCS模型在 v=∞时等价于 BG模型,MULS模型在均匀电流为 0时等价于 MTL模型。实践也表明,还没有一类模型能够完全准确地反映出雷电回击通道的全部特性,只能是最大限度地接近。在选取 DU模型作为研究模型时,通过适当选取参数在达到控制精度的同时使该模型计算出的电磁场能够实现文献[4]中所给出的电磁场应具备的 4个典型特征,与实际产生电磁场具有较好的一致性。

因雷电的产生具有随机性强、预测难度大的实际特点,为使雷电回击模型准确并实现:(1)可利用测量得到的电磁场数据推出雷击电流;(2)可预测距离雷击点极近处的电场和磁场值;(3)可获得对自然界雷击及其相关现象的更佳理解[16]。为此在建立雷电回击模型同时要做到:建立和完善当地落雷雷电统计数据库,并判断其可靠性,为准确建立雷电回击模型提供参考;结合先进的计算仿真工具,综合考虑多维参数对雷电回击电流的影响,使所建模型更具普遍性;对已建模型进行电磁场计算,以是否体现电磁场的 4个典型特征[4]为依据校验其准确性。

参考文献

[1] F. Mattos C. Christopoulos A Nonlinear Transmission Line Model of the Lightning Return Stroke[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1988, (30): 401—406.

[2] Bruce C E R, Golde R H. The Lightning Discharge[J]. J Inst Elect 1941, (88): 487—520.

[3] Uman M A, Mclain D K. Magnetic Field of Lightning Return Stroke[J]. Geophys Res 1969(74): 6899—6910.

[4] VA Rakov and M AUman. Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application[J]. IEEE trans on EMC, 1998, 40(4): 403—426.

[5] C Gomes V Cooray. Concepts of Lightning Return Stroke Models[J]. IEEE Trans on EMC, 2000, 42(1): 82—96.

[6] Lin Y T, Uman M A, Standler R B. Lightning Return Stroke Models[J]. Geophys Res 1980, (85): 1571—1583.

[7] Master M J, Uman M A, Lin Y T et al. Calculation of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields above Ground. J G R, 1982, (86): 12127

[8] R. Thottappillil M. A. Uman. Comparison of Lightning Return—stroke Models J Geophys Res, 1993, 98: 903—914.

[9] Heidler F. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation[C]. Proc 6th Int Symp Electromagn Compat Zurich, Switzerland 1985, 29F2: 157—162.

[10] Deindorfer G, Uman M A. An Improved Return Stroke Model with Specified Channel Base Current[J]. Geophys Res 1990(95): 13621—13644.

[11] V Cooray. A Model for Subsequent Return Strokes [J]. J Electrostatics 1993(30): 343—354.

[12] 田明宏,魏光辉,刘尚合.通道高度对雷电回击电磁场的影响研究[J].电波科学学报,2002,17(5):499—500.

[13] 田明宏,魏光辉,刘尚合,等.基于 IEC标准雷电后续回击电磁场的计算[J].电子学报,2003,31(6):951—954.

[14] 田明宏,盛松林,魏光辉,等.雷电回击参数对回击电磁场计算的影响研究[J].强激光与粒子束,2003,15(6):600—601.

[15] Weidman C. D., Krider E. P., The Amplitude Spectra of Lightning Radiation Fields in the Interval From 1 to 20 Mhz[J]. Radio Science 1986, (21): 964—970.

[16] 陈燕萍.浅谈雷击模型[J].高电压技术,2005,31(7):15—17.

(收稿日期:2010—01—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于分布参数模型的混合线路故障测距和重合闸的研究

陈 宾,陈 皓,刘 伟
(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:在混合线路特定参数特性的基础上,提出了一种基于分布参数模型的混合线路故障测距的新方法。首先利用有效的判据确定故障发生在架空线侧或电缆侧,然后利用故障区域的两端电气量和输电线路参数确定故障点。EMTP仿真结果和 Matlab数据处理表明,该算法具有很好的准确性,不要求双端的数据同步,而且受过渡电阻、故障类型、故障位置的影响很小,根据精确测距结果,可确定保护跳闸后重合闸动作策略,具有较高的实用价值。

关键词:故障测距;混合输电线路;分布参数;重合闸

Abstract: In view of the structures and features of transmission lines consisting of overhead lines and power cables, a new accurate fault location scheme based on distribution parameter model of combined transmission lines is presented. The method can discriminate the fault whether happened in overhead lines or power cables, then the fault location can be determined by using the transmission lines parameter and post-fault voltages and currents from the two terminals. The simulation results of EMTP and the data processing of Matlab show that this algorithm is of high accuracy and does not require the synchronized data of two terminals, and it isn't affected by fault resistance, fault type and fault location. The strategy of circuit breaker operation can be decided based on the results of the precise location. The test result shows that it is valid and efficient.

Key words: fault location; combined transmission lines; distribution parameter; reclosing

中图分类号:TM726 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0042-03

0 引 言

在现代电力系统中,随着电缆-架空线的广泛应用,其精确故障定位,具有越来越重要的意义。故障测距算法[1-8]按数据采集的位置分为:单端法和双端法。根据对两端数据采样是否同步,双端测距又分为同步测距和非同步测距。事实上即使利用最先进的全球定位系统(GPS),但现场中电压互感器(TV)、电流互感器(TA)、电缆以及保护装置对电压、电流的传输仍有一定的时延,使得两端很难做到真正意义上的数据同步,因此,不需要两端同步采样的非同步测距方法应用更加广泛。在此基础上,考虑了混合线路参数的分布特性,提出了一种基于分布参数模型和双端电气量不同步的混合输电线路故障测距算法。EMTP仿真结果和 Matlab数据处理表明它有很高的精度,并以此测距结果为依据,确定断路器断开后重合闸动作策略,在判定故障位于架空线路段时实现自动重合闸,从而提高供电可靠性。

1 基本原理

对于一条实际的输电线路,其参数是分布的,尤其对于长线路来说,若不考虑这种分布特性将会造成较大的误差。单相输电线路的分布参数模型如图 1。

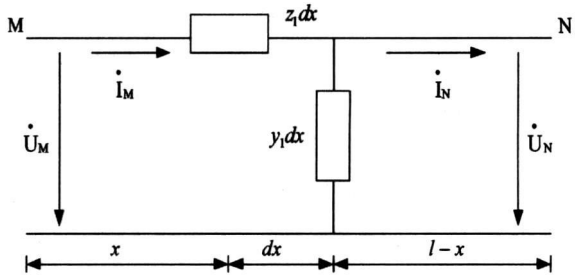

图 1 单相线路分布参数模型

其中,$\dot{U}_M$、$\dot{I}_M$、$\dot{U}_N$、$\dot{I}_N$ 分别为 M侧、N侧的电压、电流相量;线路总长为 l;z_1 为线路单位长度的复阻抗;y_1 为线路单位长度的复导纳。

若以线路 M端的电压、电流作为边界条件,可以推出以此端表示的线路任一点 x的电压和电流方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_x\\ \dot{I}_x\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cosh(\gamma x) & -Z_c\sinh(\gamma x)\\ -\sinh(\gamma x)/Z_c & \cosh(\gamma x)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_M\\ \dot{I}_M\end{bmatrix} \quad (1)$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中，$Z_c=\sqrt{(r+jwl)/(g+jwc)}$为线路的波阻抗，$\gamma=\sqrt{(r+jwl)\cdot(g+jwc)}$为传播常数；r为线路单位长度电阻；g为线路单位长度电导；L为线路单位长度电感；c为线路单位长度电容。

假设距 M端 x km处 D点发生故障。此时输电线路被分成了 MD和 DN两段，M和 D之间的任一点的电压和电流可以用 M端的电压电流来表示。同理，D和 N之间的任一点电压和电流可以用 N端的电压电流来表示。考虑两端采样数据不同步时，设不同步角为 δ，对于 D点有

$$\dot{U}_D=[\cosh(\gamma x)\dot{U}_M-Z_c\sinh(\gamma x)\dot{I}_M]e^{j\delta} \quad (2)$$

$$\dot{U}_D=\cosh\gamma[(1-x)\dot{U}_N]-Z_c\sinh[\gamma(1-x)]\dot{I}_N \quad (3)$$

根据对称分量法和线性叠加原理，将故障后的网络等效为正常状态网络和故障分量网络，选取全电量和故障分量建立 4个类似式 (2)、(3)的方程，由文献[9]得出测距结果为 D以及伪根的识别。

$$D=\frac{1}{2\beta}\arctan(B/A) \quad (4)$$

该方法虽然是在单相系统下推导出来的，对于三相系统同样成立。在三相系统中，对于所有的故障类型均存在正序网络，因此可以采用正序分量和正序故障分量代替单相系统的全电量和故障分量。

2 判 据

A型混合输电线路的一种模型[10]如图 2所示，其中架空线段为 MJ电缆段为 JN，J是架空线和电缆的结合点 (junction)。

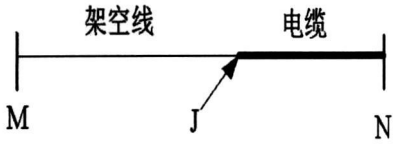

图 2 A型混合输电线路

(1)由图 2可知，设在 J处由 M端算出的电压为 $\dot{U}_{m-j}$，由 N端算出的电压为 $\dot{U}_{n-j}$，则存在如下关系：故障发生在架空线段时有 $|\dot{U}_{m-j}|>|\dot{U}_{n-j}|$，故障发生在电缆段时有 $|\dot{U}_{m-j}|<|\dot{U}_{n-j}|$，故障发生在 J点时有 $|\dot{U}_{m-j}|=|\dot{U}_{n-j}|$。

(2)当故障发生在架空线上。电缆段是完整的，可以根据方程 (1)算出架空线末端 (J端)的电压，电流。然后通过式 (4)得出故障点的距离。

(3)当故障发生在电缆上。架空线段是完整的，可以根据方程 (1)算出电缆首端 (J端)的电压、电流，然后通过式 (4)得出故障点的距离。

3 电缆 —架空线混合线路重合闸策略

为确保线路故障时尽可能地减小停电范围，并迅速恢复供电，在 1 kV及其以上的电缆 —架空线混合线路，在具有断路器的条件下，如用电设备允许且无备用电源自动投入时，一般都应装设有自动重合闸的装置。根据测距结果决定重合闸策略，在判定故障位于架空线路段时实现自动重合闸，在提高供电可靠性和稳定性方面具有重要意义。

通过式 (4)可以准确计算出混合输电线路故障点位置。如果故障发生在电缆线路，考虑到电缆线路接地故障一般是永久性故障，重合闸不仅不可能成功，而且电力系统还将再次受到短路电流的冲击而引起系统震荡，因而故障线路不应进行重合闸；如果故障发生在架空线路段，由于架空线路发生瞬时故障的可能性很大，在故障线路跳闸后，故障点的电弧即可熄灭，绝缘强度重新恢复，此时重合闸动作往往能恢复供电。

4 算法的验证

仿真模型如图 3，对输电线路采用分布参数建模，用 EMTP进行电力系统仿真用 Matlab处理数据。220 kV架空线 —电缆混合线路的电气参数为：电缆线路长度为 100 km，$R_1=0.024\ \Omega/km$，$L_1=0.4278$ mH/km，$C_1=0.2811$ uF/km，$R_0=0.412\ \Omega/km$，$L_0=1.5338$ mH/km，$C_0=0.1529$ uF/km。架空线路长度为 250 km，$R_1=0.3317\ \Omega/km$，$L_1=1.326$ mH/km，$C_1=8.688$ nF/km；$R_0=0.4817\ \Omega/km$，$L_0=4.595$ mH/km，$C_0=4.762$ nF/km。

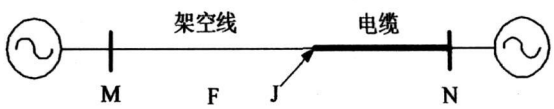

图 3 EMTP混合输电线路仿真模型

两侧数据的采样频率为 5 kHz滤波算法是改进的全波傅氏滤波[11]，采用故障后第二周期仿真数据进行处理。

(1)为验证 δ(δ∈ [−180°, 180°])和故障距离对

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 架空线上的不同步相角差时各种故障距离的测距结果

δ/(°)	不同故障位置的测距结果 /km(相对于 M端的距离)								
	5	30	75	100	115	150	185	220	240
−180	5.015	29.859	75.203	99.867	114.862	149.792	185.228	220.213	240.236
−120	5.048	30.087	75.079	100.125	115.068	150.120	185.152	220.144	240.164
−60	4.891	29.836	74.845	99.949	114.812	149.865	184.918	220.065	239.884
0	4.973	30.045	75.124	99.878	114.966	150.020	184.936	219.917	239.947
60	5.129	30.171	75.226	100.112	115.154	150.184	185.094	220.088	240.076
120	5.230	30.150	75.217	100.161	115.177	150.139	185.137	220.190	240.135
180	5.182	30.231	75.146	100.143	115.214	150.193	185.186	220.224	240.209

表 2 电缆上的不同步相角差时各种故障距离的测距结果

δ/(°)	不同故障位置的测距结果 /km(相对于 J端的距离)								
	2	9.5	30	45	50	60	78.5	85	98
−180	2.188	9.728	30.213	45.216	50.180	59.927	78.743	85.228	98.218
−120	1.931	9.586	30.176	45.161	50.131	59.941	78.669	85.145	98.166
−60	1.919	9.624	30.086	45.081	50.074	60.056	78.564	85.124	98.094
0	1.967	9.562	29.957	44.953	49.867	60.011	78.427	84.936	97.912
60	2.082	9.610	29.865	44.908	50.0648	60.096	78.588	85.112	98.120
120	2.257	9.676	30.150	45.147	50.117	60.160	78.672	85.193	98.223
180	2.112	9.733	30.172	45.235	50.191	60.234	78.733	85.215	98.248

测距结果的影响,对过渡电阻为 80 Ω, A相接地故障进行了仿真,仿真结果如表 1和表 2所示。表 1表示架空线上的 δ和故障距离对测距结果的影响,表 2表示电缆上的 δ和故障距离对测距结果的影响。由表 1可知,最大绝对测距误差为 0.231 km,可得最大相对测距误差为 0.066%;由表 2可知,最大绝对测距误差为 0.248 km,可得最大相对测距误差为 0.071%。分析表明该方法不受和故障距离的影响。

(2)相角不同步时故障类型对测距结果的影响。表 3列出了在架空线上距 M端的故障距离为 140 km或电缆上距 J端的故障距离为 35 km、δ=60°、过渡电阻等于 200 Ω时发生 10种故障类型的测距结果。由表 3可得最大绝对测距误差为 0.274 km,最大相对测距误差为 0.078%,分析表明该方法不受故障类型的影响。

表 3 各种故障类型的测距结果

故障类型	故障发生在架空线 测量的距离 /km	故障发生在电缆 测量的距离 /km
AG	140.156	35.169
BG	140.085	35.072
CG	140.117	35.130
ABG	140.162	35.095
ACG	140.210	35.274
BCG	140.133	35.135
AB	139.939	34.953
AC	139.982	34.966
BC	139.928	34.914
ABCG	140.067	35.083

(3)相角不同步时过渡电阻对测距结果的影响。表 4列出了在架空线上距 M端故障距离等于 125 km或在电缆上距 J端故障距离等于 45 km,发生 A相接地故障时的测距结果。由表 4知,最大绝对测距误差为 0.312 km,可得最大相对测距误差为 0.089%,这表明过渡电阻对测距结果不产生影响。

表 4 非同步数据下不同过渡电阻的测距结果

δ/(°)	故障发生在架空线 过渡电阻 /Ω			故障发生在电缆 过渡电阻 /Ω		
	50	100	500	50	100	500
90	125.113	125.086	125.259	45.123	45.094	45.312
45	125.092	125.062	125.198	45.070	45.076	45.185
0	125.066	125.031	125.047	45.049	45.022	45.064
−45	124.835	124.954	124.983	44.915	44.963	44.936
−90	125.157	124.874	124.835	44.862	44.940	44.789

5 结 论

由于架空线 —电缆混合输电线路的架空线路和电缆段段阻抗不匹配,不能直接用已有的架空输电线路的故障测距方法来测距,因此首先利用有效判据确定故障发生在架空线侧或电缆侧,利用正序分量和故障正序分量得出故障距离解析表达式,无需迭代搜索,计算量小,工程实用性强。根据故障测线路段,在故障线路跳闸后,重合闸动作;当故障位于电缆线路段,则不进行重合闸。仿真结果表明,该方法适用于

(下转第 63页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

L为接地网导体总长度，L=1 460+150=1 610 m;

P为接地网周边总长度，P=280 m

α、β为与深埋有关的系数，α=0.53, β=0.61

d为接地网导体的等效直径，d=0.025。

$$K_s=\frac{1\ 610-280}{1\ 610}\frac{0.53}{5\ 270^{0.25}}+\frac{280}{1\ 610}\frac{0.61}{\ln\frac{9.02\times\sqrt{5\ 270}}{0.025}}$$

$$=0.051+0.01=0.061 \quad (9)$$

最大跨步电势为

$$E_{sm}=K_sE_W=0.061\times7\ 207.2=439.6(V)$$

允许的跨步电势为

$$E_s=(250+\rho_s)\sqrt{t}=(250+600)/\sqrt{0.6}=1\ 097(V)$$

由于 $E_{sm}<E_s$，所以跨步电势满足规程要求。

2.3.3 接地体的热稳定校验

接地体的最小允许截面积

$$A_i=I\sqrt{t}/70=8\ 580\times\sqrt{0.6}/70=94.9\ (mm^2)$$

接地体的实际截面为 $50\times6=300\ mm^2$ 大于 A_i，满足安全要求。

3 结 论

现有各种降阻措施在降阻效应、抗腐蚀性和经济性等方面仍不能完全令人满意，优化设计、综合治理以及开发降阻效率高、抗腐蚀性好、成分稳定、价格低廉的新型降阻材料将成为接地网降阻研究的主流。

根据某 110 kV变电站目前的接地网埋设情况和实测的接地电阻 (R=0.84 Ω)，用厚度为 7 cm的沥青路面结构层，敷设在接地网内电气设备周围 1.5 m宽处，经此处理后，通过核算，可以看出该 110 kV变电站的均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程及设计要求。

参考文献

[1] 李润先.中压电网系统接地实用技术 [M].北京：中国电力出版社，2002.

[2] 杨曼. 变电站降低接地电阻方案 [J]. 湖北电力，2006 (30)：53－55.

[3] 王周安，曾永林. 立体地网的建立和应用. 高电压技术，1999, 22(4)：26－29.

[4] 孙旭，王琦. 变电站接地网优化设计 [J]. 广东电力，1999, 12(3)：16－18.

[5] 弋东方.电气工程电气设计手册 (电气一次部分) [S].北京：中国电力出版社，1996.

[6] 阳宏声. 雷电防护技术培训教材 [K]. 南宁：广西壮族自治区气象局政策法规处，2002.

[7] 王常余.接地技术 220问 [M]. 上海：上海科学技术出版社，2004.

作者简介：

李 彬 (1975－)，男，学士，研究方向为电力系统及自动化。

(收稿日期：2009－10－22)

(上接第 44页)

各种故障类型，不受非同步时间、故障距离和过渡电阻的影响，能够达到测距精度的要求。

参考文献

[1] 董新洲，葛耀中.一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法 [J].电力系统自动化，1995, 19(8)：47－53.

[2] 梁军，孟昭勇，等.精确双端故障测距新算法 [J].电力系统自动化，1997, 21(9)：24－27.

[3] 崔静安，王安定.一种采用双端电气量的新型故障测距算法 [J].电网技术，1996, 20(12)：17－19.

[4] 牛敏，赵舫.一种改进的双端测距算法 [J].电力系统及其自动化学报，1998, 10(1)：17－21.

[5] 卫志农，张颖，周红军.基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距 [J].继电器，2005, 33(23)：5－8.

[6] 于玉泽，覃剑，李功新，等.电缆 —架空线混合线路故障测距方法综述 [J].电网技术，2006, 30(17)：64－69.

[7] 吴承恩，邰能灵，等. 超高压电缆 —架空线混合线路故障测寻方法 [J].电力系统自动化，2005, 29(10)：26－29.

[8] 蔡华嵘，范春菊，等.一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 [J].中国电力，2003, 36(7)：31－34.

[9] 施世鸿，何奔腾.基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法 [J].电网技术，2008, 32(9)：84－88.

[10] Lee J B, Ha C W, Jung C H. Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power cables[C]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference Vancouver: 2001(1)：611－616.

[11] 陈皓.微机保护原理及算法仿真 [M].北京：中国电力出版社，2007.

作者简介：

陈 宾 (1983－)，男，四川成都，硕士研究生，研究方向：电力系统微机保护及控制。

陈 皓 (1962－)，男，四川成都，副教授，博士，研究方向：电力系统微机保护及控制。

(收稿日期：2010－01－10)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

新疆电网采取集中切负荷出现的特殊问题的思考

常喜强,张 娟,黄 净,孙谊媚
(新疆电力公司,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:切机、切负荷功能作为电网发生故障时,是保证电网安全稳定运行的重要措施,它发挥着重要的作用,尤其是切负荷功能,这在很多大区电网的区域稳定控制系统中被广泛采用,但是对于特殊的电网系统,切负荷功能虽然在保证频率稳定、电压稳定起到了很大的作用,消除故障后受端系统的不稳定问题,但同时也带来了新的问题——高电压引起的问题,需要进行研究分析。在总结了新疆电网稳控系统切负荷措施之后,对局部地区切负荷出现的特殊电压问题进行了深入分析研究,提出了相关的技术措施。

关键词:电力系统;切负荷;高电压;区域稳控

Abstract: Switching off generator or load rejection works as an important function to ensure the safe and stable operation of power grid when power grid runs improperly. Especially, load rejection is widely adoptded in stabilization control system of region grid. Whereas for special grid system, load rejection can ensure the steady frequency and voltage, and clear the unstable problem in the receiving end of power system after the fault, but it brings on a new issue—— high voltage which needs alalyzing deeply. The load rejection measures are summarized in stabilization control technique of Xinjiang Power Grid, the special voltage issue occurring in load rejection for partial area is analyezed deeply and the related technical measures are put forward.

Key words: power system; load rejection; high voltage; area stabilization control

中图分类号:TM732 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0045-04

0 引 言

电力系统的不断发展和安全稳定运行为国民经济和社会发展带来了巨大的动力和效益。从国内外长期积累的电力系统运行事故统计分析中可以看出,电力系统稳定破坏事故是危害性最大的事故之一。它严重威胁电力系统的安全运行和供电可靠性。若不能及时有效地加以控制会使电网失去稳定运行、甚至瓦解,造成大面积停电事故,给社会带来灾难性的后果。中国电力系统本属于弱联系统,但却面临着大区域互联和电力市场改革的严峻挑战,互联后的系统也将同目前的西方电网一样潜伏着大停电的危险,因此大电网的安全自动装置对推动电力系统可持续发展、保证电力系统安全稳定运行有着重要意义。

《电力系统安全稳定导则》和《电力系统安全稳定控制技术导则》对保证电网安全稳定起到了重要的作用,提出了保证电网安全稳定运行的研究方法、研究内容和研究措施,明确提出了对于电网在正常方式下受到第二类扰动后,保护、开关及重合闸正确动作,应能保证系统稳定运行,必要时允许采取切机和切负荷等控制措施,在防止频率、电压崩溃的措施中也明确提出了集中切负荷和利用低频低压减负荷装置的措施,这些对保证电网安全稳定运行起了很大的作用。

集中切负荷对保证受端系统安全运行意义重大,但是对于特殊的受端电网将会带来新的问题,在切除负荷后,将可能造成电压升高,引起相关机组进相,而造成新的稳定问题,下面就此问题进行了研究分析,并结合实际电网进行了验证分析。

1 集中切负荷作用

集中切负荷主要用于以下两个方面的问题:第一,线路停运故障,主要影响是引起网络结构的变化,使得系统与某些负荷节点的联系相对脆弱,导致负荷无法从系统获得能够维持其电压水平的足够的功率支持;第二,发电机的突然停运,会引起系统频率的下降,导致功角形式的不稳定。这两种故障都可以通过相应的切负荷措施得到缓解。

针对以上故障的切负荷措施主要有两种:一为预防性切负荷,是指电力系统运行在临近崩溃点而没有

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发生崩溃的时候,切除一部分负荷以保证系统一定的频率、电压稳定裕度;二为校正性切负荷,是指在电力系统因故障而处于频率、电压崩溃过程中或电压不可接受的紧急情况下快速切除一部分负荷,使故障后的系统能够恢复到稳定状态。

对不同故障类型采取的切负荷策略的结果不同。

对于线路停运的故障,导致频率、电压崩溃的原因不是负荷所需的功率超过了系统能够发出的功率,而是系统的传输能力无法满足负荷的功率需求。这种情况下切负荷的目的是降低负荷对系统传输能力的要求,并且在切负荷的同时也要相应地减少发电机的有功输出,保持系统的功率平衡。

对于发电机停运故障,这种情况下系统中的功率将会不平衡,这时应切除与退出运行的发电机容量相当的负荷。

2 集中切负荷需考虑的问题

集中切负荷相对于低频低压减负荷的功能来讲,更有助于频率电压的快速恢复,同时也可以有效回避低频低压减负荷中滑差参数设置问题,是有效的方法,但切负荷的动作情况不仅直接关系到系统的稳定以及频率、电压质量情况,而且与经济效益直接挂钩。在实现集中切负荷时,应进行相关的模拟分析计算,充分考虑切负荷地点、切负荷装置设置、切负荷数量的问题,综合优化实现系统快速恢复所需的切负荷最小、切负荷装置最少、系统恢复最快。

利用电力系统分析程序对切负荷动作模型模拟应注意切负荷装置模型的原理及建立过程。需考虑整个电网的变化规律、所切负荷的负荷特性、电网经济效益与可操作性。短路切负荷地点选择和切负荷量的确定是切负荷策略中的核心问题。

3 集中切负荷应注意的问题

对于网架结构坚强的系统,短路容量较大的系统,集中切负荷能有效抑制电压的降低、频率的变化,同时电网对于集中切负荷中引起系统特性 (特别是受端系统特性)变化产生的负面影响能进行有效地缓冲和化解。但是对于网架结构相对薄弱的系统、短路容量较小的系统,集中切负荷则可能引起系统特性变化较大,特别是负荷对电压敏感性较大的地区,集中切负荷后系统电压变化波动较大,会引起联络线无功潮流、地区系统无功分布发生较大波动,从而造成电压升高,造成系统联络线充电功率增大,此时受端系统负荷由于集中切负荷后负荷减少,消耗无功减小,则受端系统机组需吸收过量无功,而可能进相,造成系统稳定性降低,严重时,在系统恢复过程中会造成新的稳定问题。具体过程见图 1。

故障分析如下:当线路 L1传输大功率时,发生故障跳闸,需集中切除负荷以保证受端系统的快速恢复,则切除负荷 2、负荷 3、负荷 5,但由于线路 L1、L2均为长线路,则由于受端系统负荷的减小,吸收无功减少,此时 C2、C3、C5还在投入位置, U1、U2电压升高, Q2增大,系统电压连锁上升,引起 G1、G2机组进相,系统暂态稳定性又有所下降,恢复过程中可能造

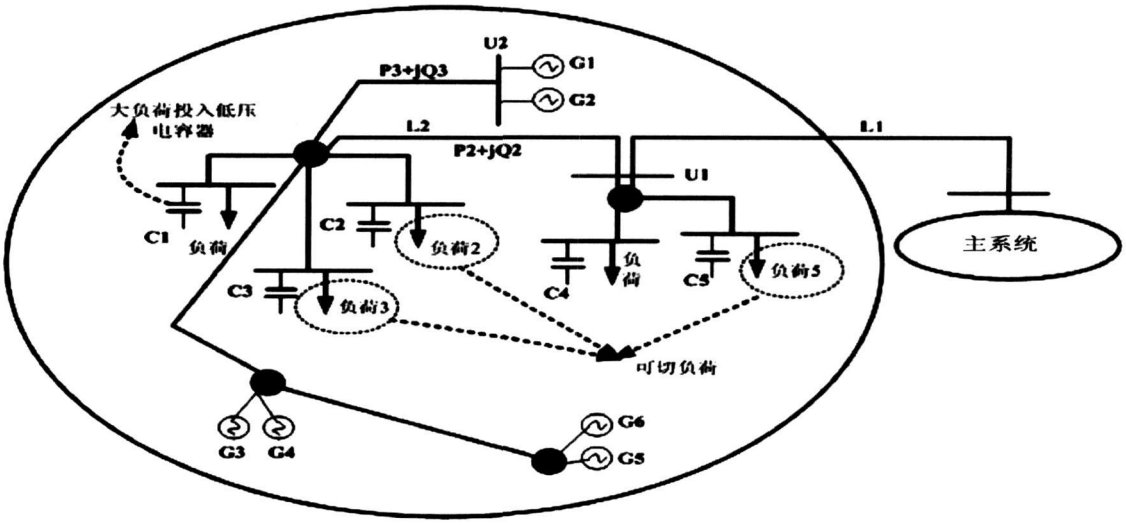

图 1 集中切负荷的连锁反应示意图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

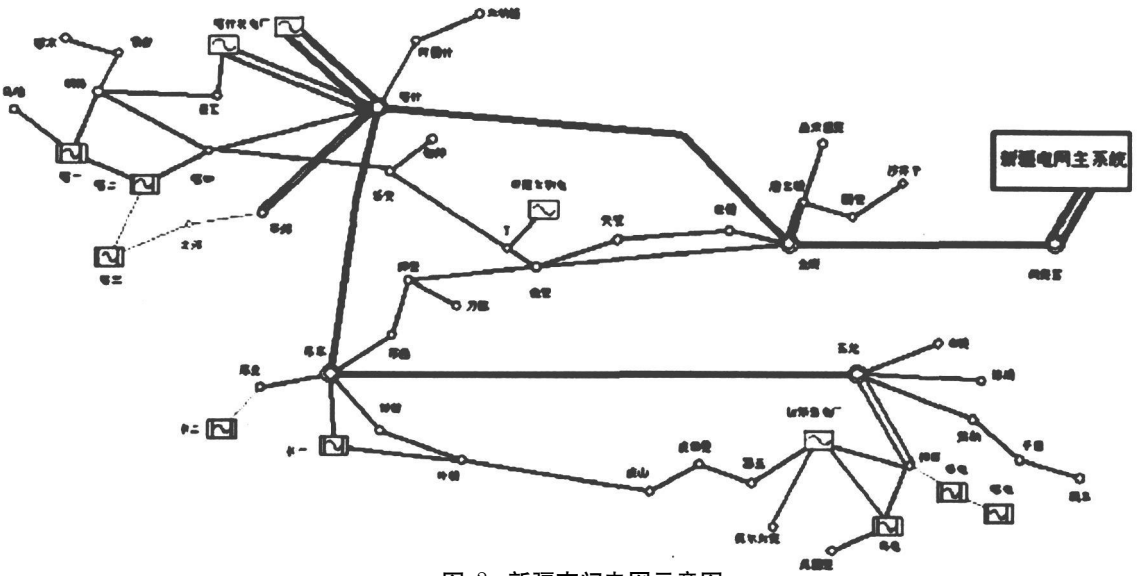

图 2 新疆南间电网示意图

表 1 系统稳定运行模拟计算结果

序号	方案	稳定性		频率	220 kV最高电压	喀发 4号机组进相深度
1	不集中切负荷	功角失稳	频率失稳	47.5 Hz	245	−25
2	集中切负荷,不联切电容器	功角失稳	频率稳定	50 Hz并波动	250	−32
3	集中切负荷,联切电容器	功角稳定	频率稳定	50 Hz	243	−18

备注:方案 2、方案 3集中切荷量相同,方案 3切除了 220 kV喀什变电站、莎车变电站、金鹿变电站低压电容器和部分 110 kV变电站的低压电容器。

成 G1、G2机组与 G5、G6机组失去稳定,产生新的稳定问题。

此种情况下,是由于受端系统长线路,短路容量较小,受端系统电压敏感性大,造成无功功率波动引起,因此,在集中切负荷时,应进行详细的分析计算和校核,注意此问题,常规模拟计算分析中往往对于低压电容器的考虑关注不足,因此对于切负荷的模拟也存在一定的误差,需要分析。

为避免此种情况的发生,在集中切负荷时,若出现此种问题,应进行深入的分析模拟讨论,并结合电压的敏感性分析,采取一定的措施——加装快切低压电容器,或配置限制电压升高的装置,或者增设电容器电压过高的保护装置,快速投电抗器装置。

4 实例分析

新疆南部电网包括阿克苏电网、喀克电网、和田电网三地区电网,电网间为 220 kV联系的弱联电网,其联网线 220 kV苏鹿线为 LGJ−2×300/【227.671 km】, 220 kV鹿喀线 LGJ−2×300/【225.857 km】, 220 kV喀莎线 LGJ−300/【180.035 km】, 220 kV玉莎线 LGJ−400/【286.278 km】,电网网架相对薄弱,稳定问题突出,目前已装设了区域稳控系统,具体网络结构如图 2。

在 220 kV苏鹿线传输 190 MW时,由于在 220 kV苏鹿线传输大功率,系统电压较低,投入大量的低压电容器,发生 220 kV苏鹿线跳闸,此时喀克一和田电网缺少功率达到 1/3,为保证喀克一和田系统安全稳定运行,快速切除部分负荷,但是从网络结构中可以看出,金鹿地区,莎车地区缺少大电源支撑,电压稳定性较低,同时与喀什发电厂联络的 220 kV喀什变电所联络的 220 kV线路均较长,切负荷后造成喀什地区电压过高,喀什发电厂机组迅速进相,引起喀什发电厂机组与和田电网机组功率失稳,系统由低频、低压问题转换为暂态功角问题,故此时需要切除部分低压电容器,来消除高电压和喀什发电厂机组的深度进相问题,从而保证系统稳定运行,具体模拟计算结果如表 1。

220 kV母线电压对比如图 3。

通过对不同方式下的研究分析,对于受端系统电压受负荷影响敏感性较大的受端地区,切负荷将造成电压波动升高较大,因此需要在切除负荷的同时,切

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

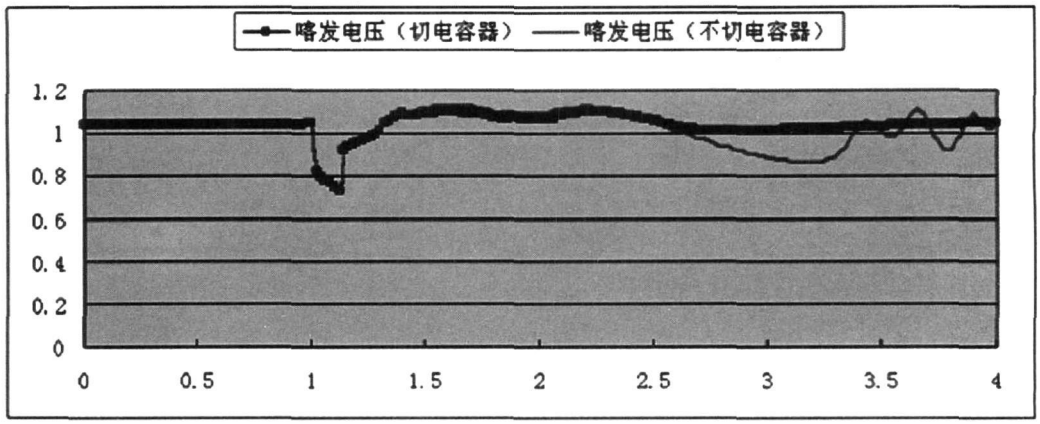

图 3 苏鹿线跳闸集中切负荷后喀什发电厂 220 kV母线电压

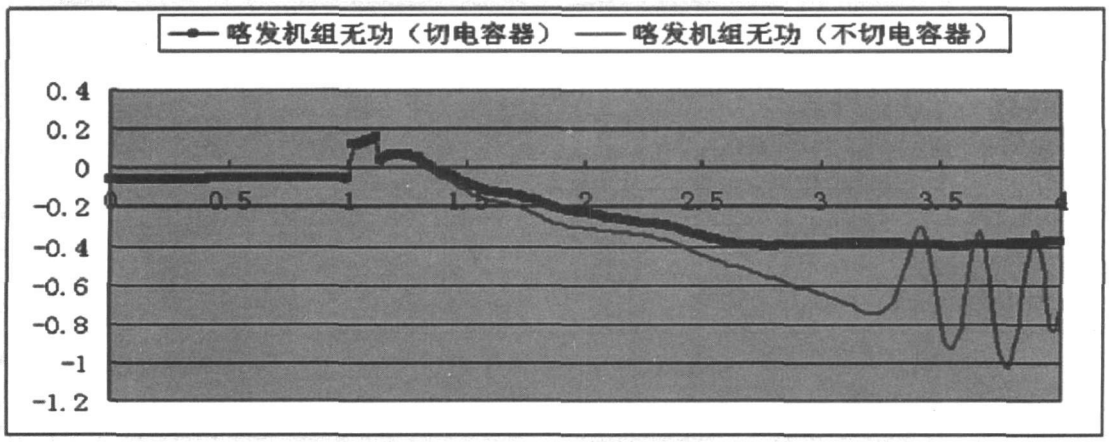

图 4 苏鹿线跳闸集中切负荷后喀什发电厂机组无功出力

除部分电容器抑制电压升高，从而减少受端系统发电机的有功、无功波动，特别是避免发电机的深度进相。因此，在新疆南部区域稳控系统中，增加了喀克受端电网在联络线跳闸后，联切负荷同时联切低压电容器功能，以此在消除发电机的深度进相和电压升高，同时对低压电容器的过电压保护定值进行了调整。

目前还在进一步的研究快切负荷后电压升高，快投高压电抗器和低压电抗器的措施。

5 结 论

新疆电网为避免此种情况的发生，在集中切负荷时，若出现此种问题，应进行深入的分析模拟讨论，并结合电压的敏感性分析，采取一定的措施——加装快切低压电容器，调整增设了电容器电压过高的保护定值，同时再进一步研究限制快切负荷后电压升高的措施。

在采用稳控装置集中快切负荷的受端系统中，建议在模拟计算分析中详细模拟负荷和低压电容器模型，对受端系统电压敏感的地区，深入研究分析电压升高问题及其带来的相关的新问题，并加以解决，确保受端电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 杨昆，陈丹思. 论切负荷动作模型的建立 [J]. 广东电力，2007, 20(12): 20－22.

[2] Hill D J. Nonlinear Dynamical Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 166－176.

[3] 周易，李东明，仇玉萍. 电压稳定性问题浅析 [J]. 安徽电力，2001, 18(1): 9－14.

[4] 王守冬，王强. 张军电力系统电压稳定问题分析研究 [J]. 电工技术杂志，2001(10): 54－56.

[5] 张元鹏. 黄要桂静态电压稳定分析中的动态元件模型及其实现 [J]. 中国电机工程学报，2000, 2(3): 66－70.

[6] P·M·安德逊，A·A·佛阿德. 电力系统稳定与控制 (第一卷) [M]. 北京：水利电力出版社，2001.

作者简介：

常喜强 (1976－)，男，硕士，高级工程师，从事电力系统稳定与控制、电力系统调度运行与控制方面的研究。

张 娟 (1977－)，女，工程师，从事电力系统稳定与控制、电力系统调度运行与控制方面的研究。

(**收稿日期**：2010－01－23)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

增强电网安全的思路

邓明燕
(四川电力送变电建设公司,四川 成都 610051)

摘 要:世界范围内的多次大面积停电事故越来越引起人们对电网安全稳定的关注。对电网进行实时的稳定评估,提供紧急控制策略,实现电网安全稳定性的在线监测和预警是位于“三道防线”之前的一个重要分析工作。随着电力市场改革的深入发展,如何提高市场环境下大电网的安全性也是需要深入讨论的问题。对电网安全稳定性的在线监测和预警以及市场条件下的处理输电阻塞等两个方面内容进行研究,为大电网安全防治提供有效的研究思路和初步的解决方案。

关键词:电网安全;在线安全评估;输电阻塞

Abstract: Several wide-spread power blackouts have drawn the increasing concerns about the security and stability of power grid around the world. Real-time stability assessment of power grid, online monitoring and forewarning which provide emergency control strategy to achieve the security and stability of power grid are an important analysis prior to "three lines of defense". How to improve the security of whole grid under the electricity market is also an issue that needs a detailed discussion. The researches about online monitoring and forewarning for the security and stability of power grid and dealing with transmission congestion under market conditions are introduced, which provides an effective research idea and a preliminary solution for the security control of whole power grid.

Key words: security of power grid; online security assessment; transmission congestion

中图分类号:TM711 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0049-04

0 引 言

电力系统安全稳定运行与国家安全、社会稳定有着重要的联系,特别是近几年来,电网发生大的安全稳定事故,冲击社会稳定、经济发展,2003年美加大停电、2006年欧洲互联电网大停电等给人们敲响了警钟。随着电力系统远距离、大容量联网运行,电力系统事故防治需要在技术经济层面上重视对供发输配各环节的规划和监控。

电力系统薄弱环节的识别和监控是位于“三道防线”之前的一个重要分析工作,目前在线或是离线训练在线判别是有效识别和监控电力系统薄弱环节的重要方式;在日益放松管制的电力市场环境下也应突现经济性与安全性的配合,以防止电网大规模停电事故的发生。

下面主要研究电网提供紧急控制策略实现电网安全稳定性的在线监测和预警,市场条件下的处理输电阻塞等两个方面内容,为大电网安全防治提供有效的研究思路和初步的解决方案。

1 在线稳定评估和故障预防

电网安全运行必须坚持“安全第一,预防为主,综合治理”的方针,因此有必要使电网时刻在稳定水平较高的状态下运行,为达此目的,必须对电网进行实时的稳定评估,掌握不同运行状态下电网的稳定水平和电网存在的潜在问题,并确定具体的预防控制策略,为运行调度人员通过合理地改变运行方式来提高电网的稳定级别,提供直接的理论依据。

目前为止,安全评估方法主要可以归为 2大类,一类是基于数学模型的安全评估方法,另一类是基于人工智能理论的安全评估方法。

1.1 基于数学模型的安全评估

基于数学模型的安全评估方法包括时域仿真法和基于 Lyapunov函数的能量函数法(直接法)。其中前者是目前为止电力系统安全评估中的最成熟、计算精度最高的方法。但是在计算系统的临界切除时间(critical clearing time, CCT)时却需要反复的凑试,计算时间较长,无法满足在线稳定评估对速度的要求。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

并且,时域仿真法最大的缺点还在于该方法只能判别系统在固定扰动下是否处于稳定状况,而不能为调度人员提供如何提高系统稳定水平的决策依据。

后者将扰动后的系统看做初态下的自治系统来研究其稳定性,使时域仿真的计算时间缩短到扰动停止时刻,大大加快了安全判别速度。但直接法也存在难以克服的缺陷,如对复杂系统模型缺乏有效的能量函数构造方法,且 Lyapunov定理本身只能提供稳定的充分条件,而不是必要条件等,降低了其稳定评估结果的准确性[1]。

基于数学模型的安全评估方法始终需要一定的时域仿真过程,计算速度很大程度上受制于系统规模。它需要针对预定的测试故障集逐一判断稳定性,难于对给定的运行方式下电网的稳定水平进行判别,人工智能技术在安全评估中的应用可望在这一方面做出补充和支撑[2]。

1.2 基于人工智能的安全评估

SCADA系统采集到运行数据的日益丰富和完善为人工智能在电力系统安全评估中的应用提供了前提条件。基于人工智能的安全评估方法的本质是建立特征变量和安全结果之间的映射关系,构造电力系统状态的快速分类器。它通过在离线的情况下进行大量的知识学习,训练一个稳定评估分类器,并生成评估稳定水平的判据,最终用生成的判据对电力系统的稳定水平进行在线评估。

人工智能型安全评估方法主要有两个关键步骤:一是选择能描述稳定水平的关键特征子集;二是稳定评估知识的获取和稳定判别规则的生成。最终将生成的规则应用于在线稳定水平的判别。

1.2.1 人工智能型安全评估流程

人工智能型安全评估过程具有如图 1示的层次型结构。

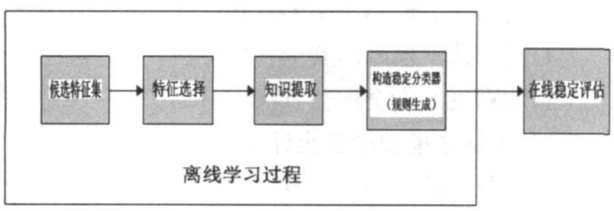

图 1 在线稳定评估流程图

1.2.2 候选特征集的抽取和特征选择

输入特征的选择是基于人工智能理论的稳定评估精度和速度的一个关键过程。就输入特征选取来说,有些学者直接根据经验指定分类器的输入特征子集[3],但是电力系统是一个典型的非线性系统,特征维数与规模成比例增长,光凭经验难于选择最能描述稳定水平的特征,从而导致稳定评估精确度不高;目前,大多数学者则采用优化组合方法从候选特征集中选择最能描述稳定水平的特征子集。

在进行特征子集的提取之前,首先要选取一个初始的候选特征集。目前,在候选特征集的选择上有两类[4]。一类是电网受扰后的动态参数构成的候选特征集。该类候选特征具有独立于网络拓扑、扰动形式和扰动地点的优点,但其不能指出运行方式中的哪些因素影响了稳定水平,以及如何调整潮流分布有助于改善稳定水平。另一类是以稳态潮流量构成的候选特征。与采用动态参数作候选特征相比,该类候选特征集具有能提供应监视的重点信息、能提供有效的预防控制对策等优点。

一般说来,初始候选特征集的抽取阶段,为了确保提供足够的分类信息,原始特征数目一般比较多,维数也很高,其中不可避免地存在大量不相关或者冗余信息。如何从原始特征集中剔除冗余信息,挑选出一组最有效的特征,以达到降低特征空间维数,确保分类能力,就是特征选择所需要解决的问题。

特征选择就是从 D维原始候选特征集中选取 d (d< D)维最有利于稳定判别的特征子集。特征选择的目的有两个:过滤和稳定评估无关的特征以及去除和其他特征强关联的特征,最终得到的是和稳定强相关而彼此不关联的最优特征子集。目前已有大量的特征选择算法,例如贪婪式的前向选择方法[5]、主成分分析法[6]以及模拟进化类方法,如遗传算法[7-8]等,并取得了一定的效果。

1.2.3 稳定评估知识的获取和稳定判别规则生成

稳定评估知识的提取就是通过对大量的样本进行分析学习,从中获取样本在特征空间的分类规律,文献[8]通过递归切割的模式发现算法从样本空间获取了样本的类分布规律,文献[9]构造支持向量机(support vector machine SVM)划分系统是否稳定的最优分界超平面和临界样本。

在获取稳定评估知识之后,需要构造一个稳定评估分类器,生成可解释性强,为运行调度人员实施决策提供直接依据的稳定判别规则,最终利用生成的规则对电力系统在线评估。在稳定评估分类器的设计方面,人工神经网络、机器学习、模式识别以及决策树等都被应用到电力系统安全评估分类器的设计上。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文献[8]应用决策树将经过模式发现获取的类分布知识生成产生式稳定评估规则,所获得的规则对稳定判别具有极高的置信度。

1.3 在线稳定评估

人工智能型安全评估方法之所以具有极高的评估速度是因为稳定判别规则是离线生成的,且不需要重复训练。一旦规则生成,就能将规则应用于在线评估。调度运行人员只需要重点监视特征选择结果中的几个极少的运行特征量,将各个运行量的大小和规则中的特征量的大小进行匹配,即能快速判别系统的稳定水平。

1.4 智能型安全评估方法需要解决的问题

虽然人工智能型安全评估方法具有评估速度快、易生成决策式的稳定评估规则等优点,但由于该类方法处于探索阶段,需要处理好以下几个关键问题。

1)样本生成方面:由于智能型方法是基于样本的学习方法,生成的规则是从有限样本中获取的,因此样本的生成直接影响规则的置信度。在样本生成过程中,要尽量保证样本包含各种可能的运行方式。

2)特征选取方面:预防控制的主要措施在于调节发电机出力和改变潮流等方法,因此用潮流量作为候选特征是最理想的选择。但是该类特征量的维数随电网规模的增加而急剧增加,从而导致特征选择过程计算量的巨大增加,因此,如何选择候选特征集也是一个待解决的问题。

3)知识获取方法方面:规则的生成直接取决于知识获取所得的结果。现有的 SVM和模式发现算法等方法都不够理想。其中 SVM所得到超平面只能判别系统是否稳定,而无法获得规则;模式发现算法对样本空间非常敏感,且事件之间的边界难于确定,这些都直接影响了所生成规则的置信度。

2 市场环境下的电网安全

市场环境下电力系统的电源规划、输电规划、可靠性评估、电力调度、有功无功和输电系统运行备用等方面都与传统垂直调度管理的电力系统有很大的不同。而市场环境下直接影响电网安全的重要环节则是输电阻塞,以及由此引发的连锁事故。美国几次大停电都是由于线路过载导线过热,弧垂增大引起接地造成的;欧洲大停电中因为在 Wehrendorf至 Landesbergen线路过载导致保护动作,从而引发一系列连锁反应,造成事故范围的扩大。

阻塞及阻塞管理是输电可靠性及其控制概念在电力市场环境下的延伸。市场环境下发电商、供电商、用户的高度独立和自由交易可能产生大规模的远距离输电交易,这将频繁改变系统的运行状态,导致潮流的不确定性加剧。例如欧洲电网实行能源市场自由化后,使得葡萄牙从乌克兰购入电力能源成为可能,这个几乎跨越整个西欧大陆的电能传输经常会导致线路过载。缓解电力网络的阻塞是保证电力市场环境下电力系统安全运行的关键,无论从缓解手段、预防策略及分析方法上都进行了很多的研究[10-13]。

系统运行人员为消除输电网络阻塞,既可以通过调整工况或发布可用传输容量(ATC)等信息来引导市场参与者,也可以通过需求侧管理在时间和空间上转移负荷,建立可中断负荷市场或引入可交易输电权来缓解输电阻塞,在必要时强制性地调整交易或“市场分裂”以消除阻塞。

从长远看消除阻塞的手段主要是改善网络结构,包括建设新线、配置 FACTS等,以提高传输容量极限。输电规划应将安全性与经济性统一成货币以量化系统的安全风险水平[14]。消除短期阻塞的手段包括调整网络结构和控制器参数,调节变压器抽头、移相器、FACTS装置等,在不改变市场交易的情况下提高输电极限,使考虑阻塞费用后的潮流达到最优[13]。当上述手段无法消除运行阻塞时,市场交易受到限制,只能基于市场机制来调整或削减发电计划。若能给出正确的市场信号,电网投资者将受到激励。因此,在增加网络投资与调整发电计划这两类措施之间存在较强的协调互补性。

关于输电阻塞管理的新进展,更多的是关注动态阻塞及其风险决策问题,以及考虑各种安全稳定约束的阻塞管理,包括电压安全。阻塞管理还涉及电力市场风险和电力系统稳定性这两者的交互影响,因为物理系统的输电极限问题不再是单纯的技术问题,需要在稳定控制中考虑阻塞管理的可行性[12]。另外可鼓励可中断负荷参与阻塞管理,建立完备的可中断负荷市场。在统一的框架中研究电力系统稳定控制与电力市场阻塞管理是值得关注的发展动态之一。

3 结 论

前面在研究电网安全分析的前提下,主要针对在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线稳定评估、市场环境下的输电阻塞问题进行研究并提出初步的解决思路。

基于人工智能的在线稳定评估方法具有在线评估速度快、生成的规则解释性强等优点。新方法可以提供运行调度人员重点监视的潮流量,根据潮流量的大小实时地掌握当前运行方式下电网的稳定水平,生成的规则可以为运行调度人员通过改变运行方式来提高系统的稳定性提供直接的理论依据,但由于该方法还只处于探索起步阶段,仍存在大量技术问题亟待解决。

指出输电阻塞是影响市场环境下电网安全的重要环节,如何完善相关的市场机制,使得电力市场的设计和运行能为电网安全提供更可靠的保障。

参考文献

[1] 管霖,曹绍杰.基于人工智能的大系统分层在线暂态稳定评估 [J].电力系统自动化. 2000, 24(21): 23—26.

[2] 管霖,王同文,唐宗顺.电网安全监测的智能化关键特征识别及稳定分区算法 [J].电力系统自动化, 2006, 30(21): 22—27.

[3] 李军,刘艳,顾雪平.基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用 [J].电力系统自动化, 2005, 29(8): 26—31.

[4] 王同文,管霖,章小强,等.基于扩展 k阶近邻法的电力系统稳定评估新算法 [J].电力系统自动化, 2008, 32(3): 18—21.

[5] 王皓,孙宏斌,张伯明,等.基于混合互信息的特征选择方法及其在静态电压稳定评估中的应用 [J].中国电机工程学报, 2006, 26(7): 77—81.

[6] 于之虹,郭志忠.改进主成分分析法用于暂态稳定评估的输入特征选择 [J].电力系统自动化设备, 2003, 23(8): 17—21.

[7] 于之虹,郭志忠.遗传算法在暂态稳定评估输入特征选择中的应用 [J].继电器, 2004, 32(1): 16—20.

[8] 王同文,管霖.基于模式发现的电力系统稳定评估和规则提取 [J].中国电机工程学报, 2007, 27(19): 25—31.

[9] 许涛,贺仁睦,王鹏,等.基于统计学习理论的电力系统暂态稳定评估 [J].中国电机工程学报, 2003, 23(11): 51—55.

[10] 冯天晶,杨光. 电力市场的输电阻塞管理方案研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 106—108.

[11] 马进,宋永华,卢强,等,开放电力市场环境下的动态阻塞管理 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 23—28.

[12] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰. 关于输电阻塞及其管理的评述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 101—107.

[13] 柯进,管霖. 电力市场下的输电阻塞管理技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 20—25.

[14] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等. 输电规划方法的评述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97—101.

(收稿日期: 2009—12—20)

(上接第 33页)

3 结 语

分布式发电并网运行是智能电网发展的必然趋势。正确考虑不同分布式电源的可靠性模型,合理地对分布式电源选址定容,可以有效地提高配电网供电可靠性,从而保证分布式发电与传统发电相结合的配电系统健康有序的运行与发展。

以上采用了区间算法对配电网在元件及负荷原始参数不确定因素时进行了可靠性评估,使得计算结果更接近工程实际。

参考文献

[1] Mukesh Nagpal Frank Plumptre Richard Fulton et al Dispersed Generation Interconnection Utility Perspective [J]. IEEE Transactionsion Industry Applications Vol 42, No 3, May/June 2006.

[2] 钱科军,袁越, ZHOU Cheng—ke 等.分布式发电对配电网可靠性的影响研究 [J].电网技术, 2008, 32(11): 74—78.

[3] 王赛一.分布式电源对配电系统的影响 [J].上海电力, 2006, 19(5): 515—518.

[4] 张鹏,王守相.大规模配电系统可靠性评估的区间算法 [J].中国电机工程学报, 2004, 24(3): 79—84.

[5] 易新,陆于平.分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法 [J].电网技术, 2006, 30(7): 50—54.

[6] 王守相,王成山.现代配电系统分析 [M].北京:高等教育出版社, 2007.

[7] 郭永基.电力系统可靠性分析 [M].北京:清华大学出版社, 2003.

[8] Allan R N, Billinton R. A Reliability Test System for Educational Purposes—Basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems 1991, 6(2): 813—821.

[9] 施伟国,宋平,刘传铨.计及分布式电源的配电网供电可靠性研究 [J].华东电力, 2007, 35(7): 37—41.

(收稿日期: 2009—08—02)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布式电源的选址及定容

冯 宁[1],王 倩[1],马峰超[2],李 刚[1]
(1.西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;2.中铁工程设计咨询工程有限公司电化院,北京 100055)

摘 要:分布式电源的接入会对配电网的运行和规划产生重要影响,影响的大小与分布式电源的位置和容量有很大关系。在分布式电源个数、位置和单个容量不确定的情况下,以配电网最小网络损耗为目标函数,应用了遗传算法优化分布式电源的位置和容量。通过算例分析,验证了所提方法能够得到较合理的分布式电源接入位置和容量的方案。

关键词:分布式发电;配电网规划;选址和定容;遗传算法

Abstract: The connection of distributed generation (DG) has a great impact on the operation and planning of distribution network, which has a relation to the selection of installation site and optimal capacity of DG. Under the uncertain number, location and individual capacity of DG, the minimal loss of distribution network is taken as the objective function, and the site and the capacity of DG are optimized using the genetic algorithm. Through the analysis of an example, it is verified that the fairly rational selection scheme for installation site and optimal capacity of DG can be obtained with the proposed method.

Key words: distributed generation (DG); distribution network planning; site selection and capacity selection; genetic algorithm

中图分类号:TM715 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0053-04

0 引 言

分布式发电(DG)是指将发电系统以小规模(发电功率在数千瓦至 50 MW 的小型模块)、分散式的方式布置在用户附近,可独立地输出电能的系统。分布式发电种类主要包括以液体或气体为燃料的内燃机发电、微型燃气轮机发电、风力发电、太阳能发电、燃料电池发电等。随着分布式发电的逐步推广,对配电网的节点电压、线路潮流、短路电流、网络可靠性等都会带来影响,其影响程度与分布式电源的位置和容量密切相关。因此,分布式电源的选址和定容十分重要[1-6]。

国内外已有一些学者对分布式电源选址和定容问题进行了研究。文献[7]在考虑新增负荷节点的情况下,由新增负荷总量确定待建分布式电源的总容量,采用遗传算法及基于支路交换的模拟退火算法进行网络扩展规划,得到分布式电源和配电网络的综合优化方案。文献[8]在已知分布式电源总容量的情况下,以实现最小配电网网损为目标,采用禁忌搜索法对分布式电源的位置和容量进行分解协调。文献[9]在给定分布式电源容量的情况下,采用解析法研究了单条辐射线路上分布式电源的最优安装位置。该模型假定负荷沿馈线按照一定的规律分布(如均匀分布、递减分布、递增分布等),但实际配电网络中负荷的分布往往是随机的。

在分布式电源个数、位置和单个电源容量均不确定的情况下,建立了配电网最小网络损耗的优化模型。根据分布式电源的特点,采用了基于支路电流的前推回代法计算配电网潮流,应用遗传算法对分布式电源的位置和容量进行优化,遗传搜索终止时得到分布式电源的优化配置方案。

1 含有分布式电源的配电网结构

分布式电源接入配电网后的结构如图 1、图 2所示。

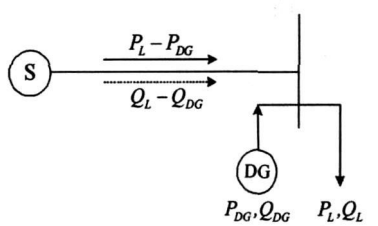

图 1 带分布式电源的简单辐射线路

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

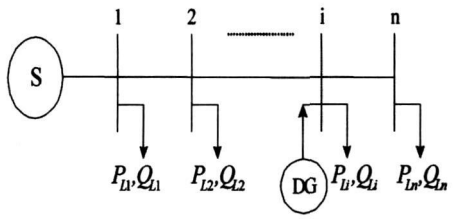

图 2 带分布式电源的单辐射线路

计及分布式电源的配电网规划必须考虑分布式电源对线路的负载能力和配电网潮流的影响。按分布式电源接入电力系统方式不同,其模型可分为 3类:同步机、异步机、换流器 (AC/DC、AC/AC)。异步发电机发出的有功功率是确定值,无功功率和极端电压有关,可视为电压静特性节点。同步发电机具有电压控制和功率因数控制两种方式,可分别作为 PV和 PQ节点处理。燃料电池等发电方式接入系统时,均需要选择 AC/DC、AC/AC转换器使之与电网相接,通过调节换流器控制策略,可以实现对其有功和无功出力的调节,因此在潮流计算中可作为 PV或 PQ节点处理。这里将把它当成具有恒定功率因数的 PQ节点,并假定分布式电源的位置在负荷节点上。

2 计及分布式电源的配电网优化模型

配电网规划的目的是根据电源发展及负荷的增长情况,合理地确定若干年后的目标网络结构,使其能在保证安全可靠的前提下,使配电系统的建设和运行费用最小。现以配电网 最小网络损耗作为目标函数。

分布式电源接入配电网后的网络损耗为

$$P_{loss}=\frac{(P_L^2+Q_L^2)}{U^2}(R+jX)+\frac{(P_G^2+Q_G^2-2P_LP_G-2Q_LQ_G)w\%}{U^2}(R+jX) \quad (1)$$

式 (1)中,$R+jX$为线路总阻抗;$w\%$为分布式电源接入配电网后距离配电所端的距离占线路总长度的百分比;P_L、Q_L分别为负荷端有功功率和无功功率;U为负荷端电压;P_G、Q_G分别为分布式电源的有功功率和无功功率。

等式约束条件如式 (2)所示,其中 P_{Gi}、Q_G分别是各节点的注入有功功率和无功功率;U_i为节点 i的电压幅值;G_{ij}为支路导纳;B_{ij}为支路电纳;δ_{ij}为节点 i与节点 j电压角度的差值。

$$h(x)=\begin{cases}P_{Gi}-U_i\sum_{j=1}^{N}U_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij})=0\\ Q_{Gi}-U_i\sum_{j=1}^{N}U_j(G_{ij}\sin\delta_{ij}-B_{ij}\cos\delta_{ij})=0\end{cases} \quad (2)$$

不等式约束条件为

$$g(x)=\begin{cases}U_{min}\le U\le U_{max}\\ |P_L|\le P_{Lmax}\\ P_{DGmin}\le P_{DG}\le P_{DGmax}\\ \max\{P_{DG_i}\}\le P_{Smax}-P_S\end{cases} \quad (3)$$

其中,P_{DGi}、Q_{DG}分别为节点注入的分布式电源的有功功率和无功功率;U和 P_L分别为节点电压和支路有功功率;P_{DG}为分布式发电额定容量;P_S和 P_{Smax}分别为配电系统从输电系统购买的实际功率和最大功率。

3 分布式电源选址和定容的求解

3.1 染色体编码

对分布式电源的位置和容量采用实数编码的方法,分布式电源的建设方案运用一组变量 $X=\{x_1,x_2,\cdots\cdots x_n\}$表示,$x_i$的大小说明了对应负荷节点 i的分布式电源建设情况。若 $x_i=0$,则说明该负荷节点 i不安装分布式电源;若 $x_i=1$,则表示该负荷节点上待建分布式电源,且安装容量为 100 kVA;若 $x_i=2$,则表示该负荷节点上待建分布式电源,且安装容量为 200 kVA,以此类推。该方法避免了二进制繁琐的编码、译码。

3.2 产生初始群体

在优化过程中,初始解一般采用随机方式产生。分布式电源位置和容量初始解的产生步骤如下。

1)计算待规划的配电网新增负荷的总容量,确定分布式电源总容量。

2)随机产生一个初始群体,并对该群体所有个体进行校验。如果所有染色体对应方案中各分布式电源容量均小于相应的负荷量,且接入容量不超过规定值,则该群体就作为分布式电源位置和容量的初始解。

3.3 遗传操作的实现

遗传算法从初始化的群体出发,以适应度函数为依据,通过对群体进行选择、交叉、变异的遗传操作,实现个体之间的信息交换和结构重组,使群体品质不断的提高并逐渐逼近全局最优解,得到下一代个体。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

所采用的 3种遗传算子如下。

3.3.1 选择算子

选择遗传算子采用最佳保留策略,即前代群体中适应度最高的几个个体直接替代掉当前群体中适应度最低的等量个体,这样就可以保证当前群体适应度不低于前代群体的适应度。

3.3.2 交叉算子

所采用的交叉算子为改进的“自适应交叉算子”。自适应遗传算法中,交叉率自适应调整公式如下。

$$P_c=\begin{cases}P_{c1}-\dfrac{P_{c1}-P_{c2}}{f_{max}-f_{avg}}(f'-f_{avg}) & f'\geq f_{avg}\\ P_{c1} & f'<f_{avg}\end{cases} \quad (4)$$

式中:f_{max}——代表群体中最大的适应度值;

f_{avg}——代表每代群体的平均适应度值;

f'——代表要交叉的两个个体中较大的适应度值。

交叉概率选择为 $P_{c1}=0.9$, $P_{c2}=0.4$。

3.3.3 变异算子

采用改进的“自适应变异算子”。自适应遗传算法中,变异率自适应调整公式如下。

$$P_m=\begin{cases}P_{m1}-\dfrac{P_{m1}-P_{m2}}{f_{max}-f_{avg}}(f_{max}-f) & f\geq f_{avg}\\ P_{m1} & f<f_{avg}\end{cases} \quad (5)$$

式中:f_{max}——代表群体中最大的适应度值;

f_{avg}——代表每代群体的平均适应度值;

f——代表要变异个体的适应度值。

变异概率选择为 $P_{m1}=0.1$, $P_{m2}=0.001$。

3.3.4 搜索终止条件

采用以下两种搜索终止条件,满足其中任何一种条件则搜索中止。

1)达到最优解连续不变最大代数 C。

2)达到遗传操作的终止代数 T。

4 算例分析

算例采用 IEEE 14节点系统,其结构如图 3所示。假设网络中允许接入分布式电源的节点为节点 2~节点 14。分布式电源的总装机容量不得超过最大负荷总量的 10%,分布式电源的功率因数为 0.9。关于多种群遗传算法参数的选取如下。各种群群体大小为 M=60,最优解连续不变对大代数 W=5,最大迭代次数 T=50。

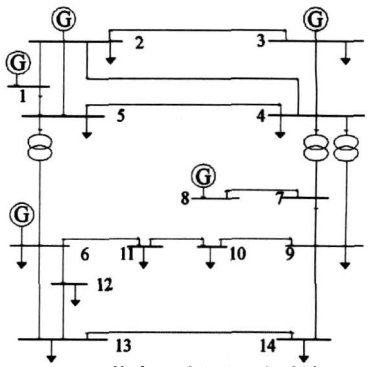

图 3 IEEE 14节点配电网测试系统图

遗传操作后得到的分布式电源位置和容量见表 1。

表 1 分布式电源的安装位置及容量

接入节点	接入容量 /kVA
4	200
9	500
12	500
13	300

表 1为模型和算法求得的分布式电源最优位置和容量信息。系统接入 DG后的有功网损为 8.200 MW,系统未接入 DG时的有功网损为 9.287 MW,优化后的有功网损下降了 11.704%,由此可得出分布式电源的合理配置能够有效的降低网络损耗。

图 4为接入分布式电源前后系统中的节点电压,由图可以看出能够有效提高系统电压水平。

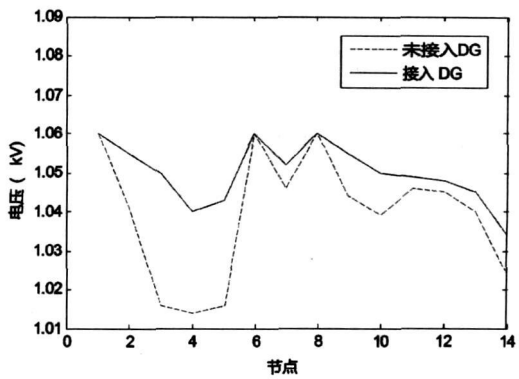

图 4 DG接入前后节点电压

5 结 语

采用了遗传算法对配电网中分布式电源的位置和容量进行优化配置,通过对 IEEE 14节点配电网测试系统算例分析,验证了该方案的有效性。采用该方案的分布式电源的接入降低了线路损耗,提高了电压稳定性。同时考虑到分布式发电带来的社会和经济效益,分布式电源的经济可靠接入配电网有十分重要的意义。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] 王建,李兴源,邱晓燕.含分布式发电装置的电力系统研究综述[J].电力系统自动化,2005,29(24):90—97.

[2] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2001(6):53—56.

[3] BORGES C L T, FALCAO D M. Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile[J]. In: Proceedings of IEEE Power Tech Conference Bologna(Italy):2003. 5p.

[4] 崔金兰,刘天琪.分布式发电技术及其并网问题研究综述[J].现代电力,2007,3(24):53—57.

[5] Fernando Bastiao Paulo Cruz Rui Fiteiro. Impact of Distributed Generation on Distribution Networks[J]. European Electricity Market 2008. EEM 2008. 5th International Conference on 28—30 May 2008:1 — 6.

[6] 王志群,朱守真,周双喜.分布式电源对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56—60.

[7] 王成山,成凯,谢莹华,郑海峰.配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J].电力系统自动化,2006,30(3):38—43.

[8] Nara K, Hayashi Y, Ikeda k, et al. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators [C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Ohio USA, 2001.

[9] GRIFFIN T, TOMSOVIC K, SECREST D et al. Placement of Dispersed Generation System for Reduced Losses[J]. In: Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Maui(HI, USA), 2000: 1446—1454.

[10] G. Carpinelli Member IEEE, G. Celli Member IEEE, F. Pilo Member IEEE, A. Russo Member IEEE. Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty[J]. Power Tech Proceedings IEEE Porto V, 2001, (4): 7.

[11] CELLI G, PILO F. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Network[J]. In: Proceedings of 22nd IEEE Power Industry Computer Applications Sydney(Australia)2001: 81—86.

[12] 段玉倩,贺家李.遗传算法及其改进[J].电力系统及其自动化学报,1998,10(1):39—52.

[13] 张奇.配电网规划中分布式电源的选址和定容[D].济南:山东大学,2008.

作者简介:

冯 宁(1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化、智能电网;

王 倩(1962—),女,教授,研究方向为电力系统调度及其自动化。

(**收稿日期**:2010—01—20)

(上接第 20页)

面电场强度几乎没什么影响,即电压极性对雷击概率的影响可忽略。当电压大于、等于 220 kV时候,同一电压等级正负极性对输电线表面电场强度的影响逐渐增大,负载电压为正极性的输电线表面场强大,其被雷击概率也大。所以在负载电压等级大于 220 kV时,电压极性对雷击概率的影响应当考虑。

(3)随雷击倾角的增大,输电线被雷击的概率逐渐减小,二者的关系函数呈多项式函数,表达式为:$Y=1.182\,08\times10^{6}-2\,012.276\,5X-11.429\,81X^{2}$,其中 Y为输电线表面场强,X为雷击入射角度。

参考文献

[1] 吴薛红.防雷与接地技术[M].北京:化学工业出版社,2008.

[2] 徐勇,汪霄飞,朱英浩,等.大气条件对空气间隙放电特性的影响及其数值解析式[J].电工技术学报,2007,22(4):21—26.

[3] 钟连宏,常美生.不同土壤电阻率对雷电放电过程的影响[J].高电压技术,1997,23(1):64—66.

[4] 王巨丰,周世濂,田树军,等.基于雷电走向与场强最大方向一致原理的接地导体雷击范围的计算[J].广西电力,2004(6):39—41.

[5] 王巨丰,周世濂,田树军,等.地面上金属接地体高度对雷击概率的影响[J].高电压技术,2005,31(4):64—65.

[6] 王晓彤,施围,刘文泉.改进电气几何模型计算输电线路绕击率[J].高电压技术,1998,24(1):85—87.

[7] 张志劲,司马文霞,蒋兴良.超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J].中国电机工程学报,2005,25(10):1—6.

[8] 钱冠军,王晓瑜,汪雁.输电线路雷击仿真模型[J].中国电机工程学报,1999,19(8):39—44.

[9] 钱冠军,王晓瑜,徐先芝.输电线路绕击分散性的试验研究[J].高电压技术,1998,24(3):17—20.

[10] 孔祥贞,郄秀书,张广庶,等.多接地点的梯级先导及回击过程的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(22):142—147.

[11] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.

[12] 章润陆,陆宠惠,李劲波.输电线路绕击率的探讨[J].高电压技术,1985,1(9):39—45.

作者简介:

李瑞芳(1980—)女,博士研究生,主要从事防雷接地技术的研究。

吴广宁(1969—)男,博士生导师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

马御堂(1986—)男,硕士研究生,主要从事防雷接地技术的研究。

(**收稿日期**:2009—10—22)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

110 kV变电站接地电阻的降低与核算

李 彬[1],郑连清[2]
(1. 重庆市电力公司江北供电局,重庆 401147; 2. 重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

摘 要:接地网是维护变电站安全可靠运行的根本保证和重要措施。阐述常用接地网的降阻处理方法,对某 110 kV变电站接地电阻高的原因进行简要分析,对其接地网重新设计,并提出选用沥青路面结构。通过对接触电势和跨步电势的核算,表明接地网满足要求,有效地解决了变电站接地系统的安全性问题。

关键词:变电站;接地网;沥青;接触电势;跨步电势

Abstract: The ground grid is an important measure to maintain the safe and reliable operation of the substation. The common ways to reduce the grounding resistance are described, a brief analysis on the causes for the high grounding resistance in a 110 kV substation is given, and then it is proposed to use asphalt pavement structure to redesign the grounding grid system. Through the check computation of the contact potential and the step potential, this design can effectively solve the security issues of substation grounding system.

Key words: substation; ground grid; asphalt; contact potential; step potential
中图分类号:TM835 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)02-0060-04

0 引 言

接地技术广泛应用于各个领域,伴随着高科技信息化时代的到来,接地技术含有更多新的概念,是具有综合性的学科[1]。目前,对于变电站接地网的研究一直是一个备受关注的领域。110 kV变电所设计是城网建设中的关键环节,变电站的接地网上连接着全站的高低压电气设备的接地线、低压用电系统接地、电缆屏蔽接地、通信、计算机监控系统设备接地,以及变电站维护检修时的一些临时接地。如果接地电阻较大,在发生系统接地故障或其他大电流人地时,可能造成地电位异常升高,造成接地系统电位分布不均,局部电位超过规定的安全值,这会给运行人员的安全带来威胁。还可能因反击对低压或二次设备以及电缆绝缘造成损坏,使高压窜入控制保护系统、变电站监控和保护设备,会发生误动、拒动,造成事故。随着电力系统的发展扩大,使接地短路电流越来越大。根据接地网的作用,在接地网设计中主要考虑因素之一就是要降低接地网的接地电阻。在分析比较目前使用较广泛接地网的降阻处理方法各自的特点及局限性基础上,对原有 110 kV变电站接地电阻较高的原因分析,重新设计接地网,并采用一定厚度的沥青路面结构层,敷设在变电站接地网内电气设备周围。通过在某 110 kV变电站接地网设计中的应用,计算其均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程要求。

1 常用接地网的降阻处理方法

有些变电站由于受地理条件的限制,不得不建在高电阻率地区,而且接地网敷设范围受到很大限制,导致这些变电站的接地电阻值偏高,无法满足现行标准的要求。如何合理、有效、经济地解决这一问题,保障变电站的安全可靠运行,将具有十分重要的理论意义和工程价值。常见的降低接地电阻的方法[2]有增大地网面积、增设接地体、引外接地、局部改善接地网周围的土壤电阻率、深孔爆破制裂压灌、电解离子接地系统等。

增大地网面积是降低地网接地电阻最为有效的措施,然而,随着面积的增大,电流密度的不均匀也在增加,降阻的效果逐渐趋于饱和。因此,当地网面增设接地体是通过增设水平接地体[3]、加装并深埋垂直接地体[4]而达到降阻的目的,水平接地体能在一定程度上减小接地极附近的电流密度,但由于相互之间的屏蔽作用而使效果受到影响。加装并深埋垂直

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接地体,从减小冲击接地电阻来看,通常有一定的效果,但从降低地网工频电阻来看,效果甚微。此外,在下层土壤电阻率较低的情况下,采用加装垂直接地体的效果是显著的;相反,当下层土壤电阻率较大时,长垂直接地体几乎没有效果。

采用降阻剂[5]或局部换土可降低地网附近的土壤电阻率,并在一定程度上降低土壤与接地体间的接触电阻,但无论是均匀土壤,还是平双层土壤,这一措施对地网的接地电阻降低作用是较小的,且降阻剂对接地体的腐蚀效应亦是一个令人头痛的问题。

深孔爆破制裂压罐[6]与电解离子接地系统是目前常用的较大幅度降低接地电阻的方法,前者在土壤表层下电阻率较高时效果极为明显,后者可使周围土壤的导电性能始终保持在较高的水平,从而充分发挥接地系统的保护作用,但此两法所需投资均较大。

目前,针对不同的工程实际情况,大多因地制宜进行综合治理[7],从而使接地网的接地电阻达到规定的要求,地网的接触电压及跨步电压在容许值的范围内。

2 降低接地电阻值的方法

所设计的 110 kV变电站位于山巅,大部分由沙土和岩石组成,其土壤电阻率 ρ值在 350 Ω·m以上。截止到 2008年,接地网的接地电阻都在 1.3 Ω以上 (规定 <1.0 Ω),变电站在这种极不安全的情况下运行。如何减小接地电阻是变电站重建的先决条件。

(1)变电站的接地网是 15年前建站时制作的,由于当时施工质量不高,加上多年的腐蚀已经不能再用,需要重新设计改造。

(2)变电站建在山上,土壤电阻率很高。要想降低接地电阻除增加接地体的接触面积外,还要降低土壤电阻率,这样才能将接地网的接地电阻降到规定范围以内。

2.1 接地网设计

接地网的网格布置采用长孔网或方孔网,接地带布置按经验设计,水平接地带间距通常为 5～8 m。方格地网的设计简单,但因为接地网边缘部分的导体散流大约是中心部分的 3～4倍,因此,方格地网边缘部分的电场强度比中心部分高,电位梯度较大,整个地网的电位分布不均匀,接地钢材用量多,经济性差。在 220 kV及以下的变电工程中,缺点不太突出。设计的变电站为 110 kV,接地网采用方格网。

根据该 110 kV变电站的原接地网图纸重新设计接地网如图 1所示,材料采用 50 mm×6 mm (等效直径 d=0.025 m), 埋深 h=1 m,均压带根数 n≥10,接地网占地面积为

$$A=85\ m\times 62\ m=5\ 270\ m^2$$

接地极和接地带焊接。为了增加接地面积,新做的接地网与旧接地网连接,主要考虑接地极数量,增加接地体的长度,对改善接地电阻起到良好的作用。

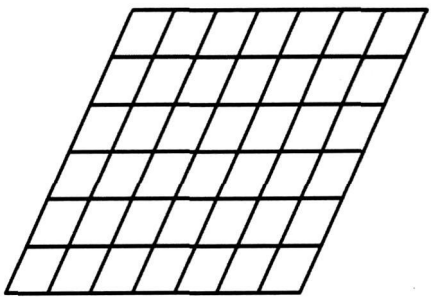

图 1 接地网示意图

该 110 kV变电站流入接地网的接地短电路 I_d=8 580 A电流,因 8 580A>500 A,故为大接地短路电流系统。

由于该变电站土壤为表层土夹石下层砾石,故取土壤电阻 ρ_s=600 Ω·m, t=0.6 s计算出的允许接触电势。

$$E_{t1}=(250+250\rho_s)\sqrt{t}$$
$$=(250+250\times 600)/\sqrt{0.6}=516\ V \quad (1)$$

接地网设计为矩形接地网, 均压带根数 n≥10,查表得 a=0.545, b=0.137, K_d=1, β=80%, K_A=1.23−9.2$\sqrt{A}$=1.106,则 n均压带根数的计算式如下。

$$n=\frac{a}{\frac{2E_t\sqrt{A}}{BK_dK_AI_d}-b}$$
$$=\frac{0.545}{\frac{2\times 516\times\sqrt{5\ 270}}{0.8\times 1\times 1.106\times 8\ 580\times 600}-0.137}$$
$$=\frac{0.545}{0.0329-0.137}=-4.5 \quad (2)$$

因 n为负值,不符合条件 (n≥0),故无解。负值表明乘积 $E_t\cdot\sqrt{A}$太小,要保证有解,必须增大 E_t或 A值。由于环境条件限制,扩大接地网面积有困难,为此,选用高电阻的路面结构层提高 E_t值,试选用厚度为 15 cm的碎石路面结构层,敷设在接地网内电气设备周围 1.5 cm宽处,碎石的电阻率在干燥状态下为 2.5×10^7 Ω·m,在潮湿状态下为 5 830 Ω·m,取计

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算用电阻率为潮湿状态下的 60%,即 ρ_s=3 500 Ω·m,因两层土壤结构反射系数为

$$K=(\rho-\rho_s)/(\rho+\rho_s)$$
$$=(300-3\ 500)/(300+3\ 500)$$
$$=-0.80$$

ρ_s层的厚度 H=15 cm=0.15 m,查表得折减系数 C=0.72,这时,允许接触电势为

$$E_{t2}=(250+0.25C\rho_s)/\sqrt{t}$$
$$=(250+0.25\times0.72\times3\ 500)/\sqrt{0.6}$$
$$=1\ 136(V) \quad (3)$$

再将 E_{t2}的值代入式(2)中计算,得

n=-5.4

因 n仍为负值,不符合条件($n\geq10$),故仍无解。需重新选择路面结构层使用材料。

2.2 选用沥青路面结构

上述选用高电阻的路面结构层无法满足要求。现选用厚度为 7 cm的沥青路面结构层,敷设在接地网内电气设备周围 1.5 cm宽处,沥青的电阻率在潮湿状态下不低于 46 600 Ω·m,取计算用电阻率为 ρ_s=46 600 Ω·m,因两层土壤结构反射系数为

$$K=(\rho-\rho_s)/(\rho+\rho_s)$$
$$=(600-46\ 600)/(600+46\ 600)$$
$$=-0.975$$

ρ_s层的厚度 H=7 cm=0.07 m,查表取折减系数 C=0.9×0.4/0.975=0.37,这时,允许接触电势为

$$E_{t3}=(250+0.25C\rho_s)/\sqrt{t}$$
$$=(250+0.25\times0.37\times46\ 600)/\sqrt{0.6}$$
$$=5\ 887.6(V) \quad (4)$$

再将 E_{t3}的值代入式(2)中计得:n=11≥10,满足变电所的实际接地网情况。

2.3 接触电势和跨步电势校验

2.3.1 计算接触电势

该变电站实测电阻为 R_C=0.84,取 R=R_C=0.84,接地网的电位

$E_W=I_GR=8\ 580\times0.84=7\ 207.2(V)\leq E_0=10\ 000$ V

(E_0为允许的接地电位)。推荐对大接地短路电流系统取 E_0=10 000 V,当 $E_W\geq2\ 000$ V时,应采取防止高电位转移措施。在对变电所的均压带根数进行反推算时,为了满足要求,已采取了措施。为安全起见,根据变电站的实际土壤情况,再对均质土壤和两层土壤中的最大接触电势进行分别核算。

(1)均质土壤

接触电势为

$$E_m=K_mE_W=K_mI_GR$$

K_m为复合接地网的接触系数。

$$K_m=\frac{L_s}{4(L_s+aL_c)}\left(\lg\frac{L_s^2}{\sqrt{Ahd}}-2\right)\left(\frac{fD}{\sqrt{A}}\right)^{0.67} \quad (5)$$

L_s为水平接地网导体总长度,L_s=80×7+60×15=1 460;

L_c为垂直接地棒的总长度,L_c=60×2.5=150;

a为修正系数,a=1.15;

f为水平均压网的均压带布置方式系数,f=1.5;

D为水平均压带的间距,D=13.4

d为接地网导体的等效直径,d=0.025。

经计算得

$$K_m=0.22\times3.267\times0.423=0.304$$

最大接触电势为

$E_m=K_mE_W=0.304\times7\ 207.2=2\ 191(V)\leq E_{t3}$

(2)两层土壤中的最大接触电势

变电站表层为 0.6 m深的沙土(置换),土壤电阻率 ρ_1=300 Ω·m,下层为沙砾,电阻率 ρ_2=1 000 Ω·m,最大接触电势为

$$K_m=I_GRM\left(\frac{D\sqrt{A}}{lL_s}\right)^{0.45} \quad (6)$$

L_s为水平接地网导体总长度,L_s=80×7+60×15=1 460;

l为单根垂直接地棒的平均长度,l=2.5 m

M为与上(ρ_1)、下(ρ_2)层土壤电阻率比值有关的函数,ρ_1/ρ_2=300/1 000=0.333,经查表 M=0.5×0.36/0.333=0.54;

D为接地网边缘垂直接地极的平均间距,D=6。

经计算得

$E_M=7\ 207.2\times0.54\times0.383=1\ 490.6(V)\leq E_{t3}$

从以上计算可看出,经过采用敷设沥青的路面后,计算出的最大接触电势均小于最大允许的接触电势。

2.3.2 校验跨步电势

接地网外的最大跨步电势为

$$E_{sm}=K_sE_w\leq E_s \quad (7)$$

K_s为跨步系数;

E_s为允许的跨步电势;

$$K_s=\frac{L-P}{L}\frac{\alpha}{A^{0.25}}+\frac{P}{L}\frac{\beta}{\ln\frac{9.02\sqrt{A}}{d}} \quad (8)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

L为接地网导体总长度，L=1 460+150=1 610 m;

P为接地网周边总长度，P=280 m

α、β为与深埋有关的系数，α=0.53, β=0.61

d为接地网导体的等效直径，d=0.025。

$$K_s=\frac{1\ 610-280}{1\ 610}\frac{0.53}{5\ 270^{0.25}}+\frac{280}{1\ 610}\frac{0.61}{\ln\frac{9.02\times\sqrt{5\ 270}}{0.025}}$$

$$=0.051+0.01=0.061 \quad (9)$$

最大跨步电势为

$$E_{sm}=K_sE_W=0.061\times7\ 207.2=439.6(V)$$

允许的跨步电势为

$$E_s=(250+\rho_s)\sqrt{t}=(250+600)/\sqrt{0.6}=1\ 097(V)$$

由于 $E_{sm}<E_s$，所以跨步电势满足规程要求。

2.3.3 接地体的热稳定校验

接地体的最小允许截面积

$$A_i=I\sqrt{t}/70=8\ 580\times\sqrt{0.6}/70=94.9\ (mm^2)$$

接地体的实际截面为 $50\times6=300\ mm^2$ 大于 A_i，满足安全要求。

3 结 论

现有各种降阻措施在降阻效应、抗腐蚀性和经济性等方面仍不能完全令人满意，优化设计、综合治理以及开发降阻效率高、抗腐蚀性好、成分稳定、价格低廉的新型降阻材料将成为接地网降阻研究的主流。

根据某 110 kV变电站目前的接地网埋设情况和实测的接地电阻 (R=0.84 Ω)，用厚度为 7 cm的沥青路面结构层，敷设在接地网内电气设备周围 1.5 m宽处，经此处理后，通过核算，可以看出该 110 kV变电站的均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程及设计要求。

参考文献

[1] 李润先.中压电网系统接地实用技术 [M].北京：中国电力出版社，2002.

[2] 杨曼. 变电站降低接地电阻方案 [J]. 湖北电力，2006 (30)：53－55.

[3] 王周安，曾永林. 立体地网的建立和应用. 高电压技术，1999, 22(4)：26－29.

[4] 孙旭，王琦. 变电站接地网优化设计 [J]. 广东电力，1999, 12(3)：16－18.

[5] 弋东方.电气工程电气设计手册 (电气一次部分) [S].北京：中国电力出版社，1996.

[6] 阳宏声. 雷电防护技术培训教材 [K]. 南宁：广西壮族自治区气象局政策法规处，2002.

[7] 王常余.接地技术 220问 [M]. 上海：上海科学技术出版社，2004.

作者简介：

李 彬 (1975－)，男，学士，研究方向为电力系统及自动化。

(收稿日期：2009－10－22)

(上接第 44页)

各种故障类型，不受非同步时间、故障距离和过渡电阻的影响，能够达到测距精度的要求。

参考文献

[1] 董新洲，葛耀中.一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法 [J].电力系统自动化，1995, 19(8)：47－53.

[2] 梁军，孟昭勇，等.精确双端故障测距新算法 [J].电力系统自动化，1997, 21(9)：24－27.

[3] 崔静安，王安定.一种采用双端电气量的新型故障测距算法 [J].电网技术，1996, 20(12)：17－19.

[4] 牛敏，赵舫.一种改进的双端测距算法 [J].电力系统及其自动化学报，1998, 10(1)：17－21.

[5] 卫志农，张颖，周红军.基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距 [J].继电器，2005, 33(23)：5－8.

[6] 于玉泽，覃剑，李功新，等.电缆 —架空线混合线路故障测距方法综述 [J].电网技术，2006, 30(17)：64－69.

[7] 吴承恩，邰能灵，等. 超高压电缆 —架空线混合线路故障测寻方法 [J].电力系统自动化，2005, 29(10)：26－29.

[8] 蔡华嵘，范春菊，等.一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 [J].中国电力，2003, 36(7)：31－34.

[9] 施世鸿，何奔腾.基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法 [J].电网技术，2008, 32(9)：84－88.

[10] Lee J B, Ha C W, Jung C H. Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power cables[C]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Vancouver: 2001(1)：611－616.

[11] 陈皓.微机保护原理及算法仿真 [M].北京：中国电力出版社，2007.

作者简介：

陈 宾 (1983－)，男，四川成都，硕士研究生，研究方向：电力系统微机保护及控制。

陈 皓 (1962－)，男，四川成都，副教授，博士，研究方向：电力系统微机保护及控制。

(收稿日期：2010－01－10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

集控型微机五防系统在监控中心的应用探讨

刘人礼
(自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘 要:针对目前在自贡电业局使用的集控型微机五防系统,从系统的结构、功能、运行特点等方面进行了分析。提出了集控型系统应用的建议。

关键词:集控型;微机五防系统;应用探讨

Abstract: As viewed from the centralized control computer-based five-proof system used recently in Zigong Power Supply Bureau, the structure, function and operating characteristics of the system are analyzed and the suggestions for the application of centralized control system are proposed.

Key words: centralized control; computer-based five-proof system; application discussion

中图分类号:TM769 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0064-02

0 引 言

随着变电站综合自动化、调度自动化技术在电力系统的广泛运用和不断发展,变电站无人值守、中心站监控的运行模式已在电力系统大面积推广,从而形成了运行人员集中到监控中心值班,对所辖变电站设备进行集中监控、统一操作、统一维护的一种新的运行模式。

一般来说,一个监控中心所辖的所有变电站倒闸操作统一由一个操作队负责,由于各变电站的电气主接线、现场设备不同,操作人员面临的设备数量大,种类多,人员对设备的实际运行状态不够熟悉,发生误操作的风险大大增加。这种新的运行模式对倒闸操作的安全提出了新的要求。因此如何统一防误操作闭锁模式、规范多个变电站的倒闸操作管理,成为目前摆在大家面前急需解决的十分重要的课题。

采用集控型微机五防系统后,适应了集中控制的运行模式,满足了远方操作层、站控层、间隔层、设备层的分层操作闭锁原则;同时也符合《国家电网公司防止电气误操作安全管理规定》、《四川省电力公司220 kV及以下无人值班变电站技术原则》的要求。

下面就第一次在自贡电业局下属自流井供电局监控中心使用的集控型微机五防系统进行分析,比较集控型微机五防系统与单个变电站微机防误装置在运行工作中的优、缺点,提出系统应用的建议,为进一步推广使用好集控型微机五防系统打下基础。

1 集控型微机五防系统的结构

该系统装设在自流井供电局监控中心内,设有五防主机和服务器各 1台,与中心站监控后台机相连互传遥信信息和操作闭锁信息;变电站五防子站和变电站当地监控系统采用原有设备。集控型微机五防系统主站与各变电站五防子站之间设有专用的五防通信网络,一般采有 2 M的通道能满足通信的要求。

1.1 网络信息流向

子站五防机接收当地监控系统的实遥信,并将现场的虚遥信送到当地监控系统,闭锁当地监控系统的遥控操作;主站五防主机采集中心站监控系统的实遥信,并将现场的虚遥信送到中心站监控系统,闭锁遥控操作。通过五防专用通信网络,采用同步、对话方式,实现主站与子站信息的上传和下送,有效地保证了五防主站、子站真实反应现场设备的实际状况。

另外,主站、子站的操作票能够自动更新到操作票数据库,实现操作票数据共享,以便系统自动对操作票进行统计、归类等数据处理。

1.2 子站的工作模式

子站有集控工作模式、当地工作模式两种。当五防通信网络故障时,子站自动切换至当地工作模式运行,通信网络恢复时又切回集控工作模式,这样保证了五防子站既能联网运行,也能独立运行。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 集控型微机五防系统的功能

(1)可实现集中开票分散操作。

可以在监控中心对各子站的操作任务进行模拟开票、模拟预演,下传操作票到电脑钥匙,由操作队人员携带电脑钥匙到相应的子站进行倒闸操作;也可以将操作票传到子站的五防微机上进行操作。

(2)除具备一次设备的常规“五防”闭锁功能,还可以实现子站之间设备逻辑判断及闭锁的功能,如对侧变电站接地开关未拉开或临时地线没有拆除情况下,闭锁本站操作。

(3)具备一次设备、二次设备状态信息的上传下送功能。

系统除能够接受由监控系统传来的设备状态,还能采集无接点的虚遥信状态,对于压板、空气开关、保险、熔丝、转换开关等二次设备状态也能够在中心站集控型微机五防系统上体现其运行状态。

(4)在紧急情况下,采用密码授权的方式,实现软件“万用解锁钥匙”功能,满足解锁遥控操作的要求。

3 集控型微机五防系统的运行特点

(1)操作票填写方式灵活,既可在子站就地填写,也可从监控中心数据库远程调取。

一般情况下,操作队人员到达变电站现场后,才填写操作票进行操作。当电网有临时的检修停电任务或事故、异常处理需快速完成倒闸操作时,可采取从监控中心数据库远程调取操作票的方式进行操作。

具体过程为监控中心接受调度指令后,立即安排运行人员填写好操作票,并保存至主站的微机五防服务器,同时通知操作队到子站进行倒闸操作。操作队人员到达变电站后立即调用微机五防服务器中保存的本站操作票,经审核后下传到电脑钥匙,进行现场的倒闸操作,节省了现场填写操作票的时间,提高了变电站的操作速度。

(2)实现远程监护,节约人力资源。

正常的倒闸操作一般至少由两人完成,一人操作,一人监护。采用集控型微机五防系统后,能实时监控子站五防系统的运行状态,实现了远程监护的功能,那么对于一般性、不太复杂的操作任务,可安排单人到变电站完成操作,满足倒闸操作的安全要求。具体体现在以下几个方面。

1)监护人员在监控中心可以对运行人员的操作票进行实时审核,也可从监控中心下传操作票,操作人员审核。

2)对模拟预演进行实时监护。操作人员在五防子站微机上进行模拟预演时,监控中心的监护人员可实时查看模拟预演的进程,若模拟预演不正确,中心站可及时立即决定终止操作。

3)对变电站现场人员是否使用防误装置的行为进行监督。集控型微机五防系统可以对设备的人工置分合、事故正常分合、微机防误分合进行实时报文。

(3)实现对二次设备的远程巡视,确保电网安全。

常规巡视中,运行人员往往重于一次设备的巡视,轻二次设备的巡视;监控系统虽然可以查看保护定值、远方投退保护和自动装置,但不能全面检查二次设备的运行状态,易于留下安全隐患。采用集控型微机五防系统后,由于监控中心可以采集五防子站设备无接点的虚遥信状态,因此运行人员就可以随时查看变电站的二次保护压板、空气开关、熔断器、切换开关的实时状态,及时发现存在的问题,确保电网安全。

(4)实现远程维护,减少劳动强度。

通常情况下,运行人员必须定期到监控中心管辖的所有变电站现场,对防误操作系统进行维护,检查逻辑条件库、五防设备的遥信表、编码表是否正确,修改变化了的主接线图及相应的数据库等。采用集控型微机五防系统后,监控中心可以远程调取子站的所有数据,远程维护,再自动同步数据即可,不需再到现场进行维护。

(5)实现子站间的逻辑条件闭锁,减少误操作的发生。

由于集控型微机五防系统对所辖的变电站进行了网络拓扑,将关联变电站之间的倒闸操作需要进行逻辑判断的条件写进了规则库,因此,变电站倒闸操作时需首先判断对侧的安全措施是否拆除(接地刀闸是否拉开,接地线是否拆除),然后才会允许设备送电,进一步避免了误操作的发生。适用条件:只能在本系统所覆盖的变电站范围内,一般以一个监控中心为界。

4 系统应用的建议

(下转第 88页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

寿命至少在 30年以上,按照接地系统的寿命应不小于地面设备的寿命的原则,基本不存在接地网改造的问题,可以做到免维护、长期有效的运行。

从目前单价上来看,铜材肯定是比钢材贵。铜的价格基本是钢的 4～5倍,而铜包钢接地棒则比钢材贵而比铜材便宜。

本次广元 110 kV GIS九华变电站铜材与铜包钢接地棒要比传统接地网多些,但接地网不同于其他设备,其改造工作的难度大,对运行设备的影响大,特别是改造过程中的安全问题。所以,综合考虑一次性投资、运行维护的难度、定期开挖检查的安全性,接地网寿命、改造费用等,则无论从经济方面还是技术方面,铜接地网技术无疑是优先考虑的。

2 结束语

GIS变电站接地体的品质关系到 GIS设备和人身的安全以及整个电力系统的正常稳定运行。接地体的材料、截面以及导体连接方式直接影响到接地系统的品质和寿命。相比而言,铜接地体性能更加稳定、可靠、免维护、寿命长,而且施工更容易方便,更适用于 GIS变电站接地系统。

在 110 kV、220 kV GIS变电站接地网设计中,建议尽量少采用外扩地网的设计思路和原则,优先考虑增加垂直接地体深度、深孔、电解离子接地极、敷设增强接地材料等方式来降低接地电阻。综合各种运行维护因素考虑,建议在 110 kV、220 kV GIS变电站接地网设计中均采用铜接地材料或铜包钢接地材料,以保证变电站设备及接地装置长期、可靠、稳定运行。

参考文献

[1] IEEE Std 80 2000, Guide for Safety in Substation Grounding [S].
[2] GB 50169－92,接地装置施工及验收规范 [S].
[3] GB 50343－2004,建筑物电子信息系统防雷技术规范 [S].
[4] GB 50169－2006,接地装置施工及验收规范 [S].
[5] 四川省电力公司反事故措施实施细则 (试行) [Z].

(**收稿日期**: 2009－11－21)

(上接第 65页)

(1)采用独立的五防通信网络,避免系统间的干扰。

监控中心主站与子站之间应组织专用的通信通道,以便将子站的状态信息与现场设备的实时状态信息及时上传主站。五防网络应尽量与监控系统网络、SG186生产信息管理系统网络分开。新建变电站或变电站综合自动化改造时,应预留五防网络的专用通信通道。

(2)监控系统应根据集控型微机五防系统的技术要求作相应的调整配合。

主站的集控微机五防系统与远方监控系统、子站的五防系统与当地监控系统都要进行通信闭锁,这就要求监控系统提供相应的闭锁模块,甚至修改通讯规约等。因此监控系统新建或改造升级时,应考虑配置与微机五防系统的通信模块,便于集控型微机五防系统接入时能及时进行安装调试,实现五防系统与监控系统的同步投入运行。

(3)对二次设备进行模拟预演、下传操作票将影响倒闸操作速度,建议改变二次设备的模拟预演形式。

由于监控中心需要采集五防子站设备无接点的虚遥信状态,因此在倒闸操作时,二次设备需进行模拟操作、下传操作票、提示性操作。这种操作方式虽然保证了五防主站与子站二次设备状态的一致性,但将影响倒闸操作速度。

如果不进行模拟预演,二次设备的对位可采取操作前快速模拟或操作后进行模拟、人工置分合等方式进行,可能会留下安全隐患,不能确保数据的自动同步。

目前,国家电网公司对变电站二次设备是否需模拟预演未作明确的规定。因此建议改变二次设备的模拟预演形式,改为操作完毕后进行核对性模拟预演,通过电脑钥匙的下传对位后完成二次设备的自动复位。这样既可以避免二次设备人工置分合时出现的差错,也可以避免操作前快速模拟造成设备未操作就已自动复位留下不安全隐患的情况。

5 结 语

自贡电业局自流井供电局运行、使用集控型微机五防系统后,有效提高了倒闸操作的效率,缓解了运行人员不足的矛盾,确保了电网的安全稳定运行,同时也为该局今后推广应用此系统积累了丰富的经验。

参考文献

[1] 国家电网公司防止电气误操作安全管理规定 [Z].
[2] 四川省电力公司 220 kV及以下无人值班变电站技术原则 [Z].

作者简介:

刘人礼 (1969－),高级工程师,自贡电业局副总工程师,长期从事电力系统运行管理及生产技术管理工作。

(**收稿日期**: 2009－12－03)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

输电线路合闸于故障保护原理综述

钟 超,陈 皓
(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:对合闸于故障保护的原理及识别判据进行了综述,提出了理论研究中存在的问题,并对目前的最新研究动态进行了介绍。最后,对合闸于故障保护的发展前景进行了展望。

关键词:输电线路;合闸于故障保护;继电保护

Abstract: The principle and identification criterion for switching into fault protection are described, the existing problems are given in theory studies, and new research trends are presented. At last, the developing direction of switching into fault protection is prospected.

Key words: transmission lines; switch onto fault protection; relay protection

中图分类号:TM771 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0070-04

0 引 言

暂态保护因其与线路参数、故障情况等有关,而与系统运行状况、过渡电阻等无关,且不受工频现象影响,故障检测、识别比工频量快得多等优点,因而通过对线路暂态量的研究来寻求对高压输电线路的保护是继电保护的一大研究热点。

20世纪 70年代末,Chamia等人利用故障时电压和电流行波极性的不同作为保护判据。20世纪 90年代,Z Q. Bo和 A. T. Johns等人又提出了利用双端信息综合判断以实现方向保护。在此基础上,A. T. Johns等又提出了利用弧光故障所产生的高频电流信号作为判断量[2]。随着研究的不断深入,行波保护[6,7]理论已日趋完善,比较成熟的有:行波极性比较式方向保护(又称为 RALDA型保护)、行波差动保护、行波判别式方向保护、行波幅值比较式方向保护以及行波电流极性比较式方向保护。20世纪末,A. T. Johns和 Z Q. Bo等人经过一系列的研究,又提出了利用单端暂态量来实现对线路的保护,并将这一保护原理应用在平行双回线上取得了很好的效果。但无论采取什么样的保护判据,由于雷击、刀闸操作等所引起的暂态信号容易引起保护误动、难以实现故障选相、电压过零点故障时保护灵敏度不够等问题。同时,为防止因线路合闸过程产生过电压导致事故发生,要求断路器合闸操作产生的行波和暂态量能使保护启动,若线路上有故障,则保护应迅速动作以切除故障;若无故障,则保护不应误动。因此,合闸保护面临断路器合闸时如何正确识别线路状况的问题。现有的保护判据,无论是基于工频量的保护还是暂态量保护,均不同程度地存在着这样或那样的不足之处,难以实现保护中断路器对被保护线路的正确识别。重点对目前研究比较广泛的四类合闸于故障保护原理进行了介绍,并对其中存在的问题以及高压电网中合闸于故障保护的应用前景做了简述和展望。

1 合闸于故障保护研究现状

输电线路的合闸操作大致可分为两种:空载合闸和自动重合闸。无论是哪一种合闸操作,都要求继电保护能够正确识别线路情况。尤其是针对 500 kV以上输电线路而言,由于合闸操作将在线路上引起不可预想的过电压,严重时将直接导致线路绝缘体的损坏直至引起整个电网的崩溃。因而,对合闸于故障保护的研究提出了更高的要求。

1.1 基于行波测距和行波极性的合闸于故障保护

文献[8]通过对断路器合闸时引起输电线路上的行波过程和方向行波的特征进行分析,提出了基于行波来判断断路器是否合闸于故障线路的判据。

(1)TV位于线路侧,合闸操作瞬间仅能检测到正向初始行波(设到达时间为 t_1);反向初始行波(设到达时间为 t_2)由对端母线的反射产生。令

$$l=\frac{t_2-t_1}{2}v \tag{1}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中，v为行波传播速度。若线路上无故障，计算得到的 l等于或大于被保护线路全长 (L)，即有 l≥L(当对端母线仅有一进一出两条出线时有 l≥L除此之外有 l=L)。若线路上有故障，计算得到的 l为故障距离，它小于被保护线路全长，即 l<L。

(2) TV位于母线侧，合闸操作瞬间既能检测到正向行波也能检测到反向行波 (母线仅有一进一出两条线路时仅能检测到反向行波，设反方向初始波头到达时间为 t'_1，反方向第二个波头到达时间为 t'_2，令

$$l' = \frac{t'_2 - t'_1}{2} v \tag{2}$$

若线路上无故障，计算得到的 l′等于或大于被保护线路全长，即 l′≥L。若线路上有故障，计算得到的 l小于被保护线路全长，即 l′<L。

结合方向行波的特征，当 TV位于线路侧时：若线路有故障，反向行波与初始正向行波极性相反；若线路无故障且对端开关断开，反向行波与初始正向行波极性相同。若线路无故障且对端开关闭合，对端母线只有一条出线时，方向行波与初始正向行波极性相同；对端母线有两条出线时，无反射波存在；当对端母线有 3条或以上出线时，方向行波与初始正向行波极性相反。TV位于母线侧时：初始反向行波与故障点二次反向行波极性相同，其他情况下二者的关系也与 TV位于线路侧时的结论相反。

综上所述，得出合闸于故障线路的识别判据如下。

(1)线路空载合闸时的判据为：线路有故障时 l(l′)≤L+△L反之线路无故障；

(2)线路对端开关先合，对端母线出线有 3条以上出线时的判据为：线路有故障时，l(l′)≤L-△L反之线路无故障。

1.2 基于不同期合闸的行波合闸于故障保护

文献 [9]根据线路有故障与无故障情况下行波反射系数的不同，提出一种新的行波合闸保护方法。

(1)对于单相无损线路，反向行波将是正向行波经过时间 τ(τ为行波从线路一侧传播到另一侧所用的时间) 的延迟再取反，并且在合闸后的时间范围内都成立。即

$$i_b(t) = -i_f(t-\tau) \tag{3}$$

式中，$i_b(t)$为反向行波；i_f为正向行波。

(2)对于单相有损线路，因线路有损，式 (3)将近似成立，为便于判断，将式 (3)中 $i_b(t)$和 i_f离散化并引入了反向行波与正向行波的相关系数 $C_{oeff}(n)$，其定义为

$$C_{oeff}(n) = -\frac{\sum_{k=n}^{M+n-1}[i_f(k+T_f)i_b(k+T_b)]}{\sum_{k=n}^{M+n-1}[i_f(k+T_f)]^2} \tag{4}$$

式中，n为计算相关系数所取数据的起始点；M为计算相关系数对应的时窗宽度，以采样点数表示；T_f和 T_b为正、反向行波的初始行波波头到达的时刻。

(3)对于三相输电线路，将三相线路解耦为 3个相互独立的单相线路，并以单相线路进行分析与计算。此时，三相输电线路的断路器的 3个触头是不同期闭合的，即三相输电线路存在不同期合闸的问题。

对此，提出了行波合闸保护的实现步骤。

1)使用文献 [10]提出的不同期合闸行波采集方案对线路合闸产生的行波进行采集，采集量包括三相电流行波与线路侧三相电压行波。

2)将合闸引起的三相电压与电流行波使用变换矩阵进行相模变换，得到零模与 α模、β模、γ模 3个线模。

3)提取 α、β、γ线模，分别使用式 (5)和式 (6)计算 3个线模的正向行波 $i_{fm}(n)$与反向行波 $i_{bm}(n)$。

$$I_{fm}(n) = \frac{u_m(n)}{2Z_{Cm}} + i_m(n) \tag{5}$$

$$i_{bm}(n) = \frac{u_m(n)}{2Z_{Cm}} - i_m(n) \tag{6}$$

式中，n为采样点；m为 α、β、γ这 3个线模；$u_m(n)$和 $i_m(n)$分别为 α、β、γ线模的电压和电流行波。

4)利用三次 B样条小波寻找 α、β、γ线模正、反向行波的初始行波波头[10]，得到 α、β、γ线模正、反向行波的初始行波波头到达的时刻 T_{fm}和 T_{bm}。

5)令计算反向行波与正向行波的相关系数的起始时间。

6)将 3个线模的 T_{fm}和 T_{bm}以及 T_{st}代入式 (4)，计算 3个线模正向行波与反向行波的相关系数 $C_{oeffm}(T_{st})$。

7)若 α、β、γ线模正向行波与反向行波的相关系数 $C_{oeffm}(T_{st})$有一个小于 C_{zd}，则认为线路有故障；若 $C_{oeffm}(T_{st})$均大于 C_{zd}，则需要判断三相断路器是否已经闭合了一定的时间 (闭合时间应远大于行波在线路上往返一次的时间)，若断路器已经闭合，则判断为线路无故障；否则令 $T_{st}=T_{st}+N$ (N表示向后推移的时间步长)，将计算相关系数的时间向后推移一

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定时间,转步骤 6)重新计算。

1.3 基于行波测距原理的合闸于故障保护

文献[11]通过检测初始前、反向行波到达保护安装处的时间间隔来计算出线路长度,与被保护线路全长比较,判断是否合闸到故障线路,提出了三类识别判据如下(判据中初始前行波 F及初始反行波 B到达 M侧的时刻分别为 t_F和 t_B,Δt_{BF}为前、反行波到达 M侧的时间差)。

判据 1:当线路断路器空载合闸时,在 t_F、t_B时刻分别检测到模量初始前行波 F和模量初始反行波 B,若$\Delta t_{BF}=t_B-t_F=2l/v<2T$(7)成立,则该线路上有故障。

为了确保判据 1的可靠需添加一小段时间裕度,此时式(7)变为式(8),即:$\Delta t_{BF}=t_F-t_B=2l/v<2T-\tau$。

判据 2:当$\Delta t_{BF}\geqslant 2T-\tau$时,若存在 2个线模初始前行波 F与初始反行波 B极性相反,则该线路上有故障,且故障位于线路末端附近。但对于以下 2种特别的情形可能无能为力:

(1)少数线路末端故障而仅有 1个模量前、反行波极性相反的情况。

(2)线路末端经高阻接地的故障会造成故障点的反射波较小,在一定的反行波门槛值之下,就有可能检测不到与前行波极性相反的故障点引起的反行波,以致出现 3个模量前、反行波极性都相同的情况。

判据 3:当$\Delta t_{BF}\geqslant 2T-\tau$,且仅有 1个线模的初始前、反行波 F与 B极性相反或 3个线模 F与 B极性都相同时,提取合闸相电流的低频能量 E_L和高频能量 E_H,计算比值 $\lambda_h=E_L/E_H$。若任一相的 $\lambda_h>k_h$(门槛值),则线路末端有故障;若三相的 λ_h均小于 k_h,则线路末端无故障,即整条线路无故障。

1.4 基于频率特征的合闸于故障保护

文献[11]在对空载线路合闸操作暂态过程频域特征进行了详细分析,并对不同线路长度进行合闸于非故障线路和故障线路的自振频率分量进行仿真,定性地得出了线路合闸操作暂态过程的基本特征为:断路器空载合闸于非故障线路时,线路中存在明显的自振频率分量。自振频率分量幅值较大,远远大于基频分量的幅值,仿真实验更进一步证实随着线路的增长,这种自振频率分量的幅值将减小,即自振频率与线路长度存在近似的反比关系;而断路器空载合闸于故障线路时,线路中不存在明显的自振频率分量。此时,线路中主要包含衰减直流分量和故障基频分量,以及幅值很小的高频分量。据此,可以得出在空载线路合闸过程中如何判别是否合闸于故障线路的定性判据。

判据 1:断路器空载合闸于非故障线路时,线路中存在明显的自振频率分量,且自振频率分量随着线路的增长而逐渐减小。

判据 2:断路器空载合闸于故障线路时,线路中不存在明显的自振频率分量,且线路中主要包含衰减直流分量和故障基频分量以及幅值很小的高频分量。

2 合闸于故障保护发展中存在的问题

2.1 基于行波测距和行波极性的合闸于故障保护

通过行波的极性关系、行波测距结果等时域特征判据识别出合闸线路是否存在故障。由其判据关系式(1)知,当线路末端附近发生故障时有 $l\approx L$,测距结果与线路无故障时相同,而行波在线路末端反射情况较复杂,正反向行波的极性可能出现与无故障线路空载合闸相同的情况,因而识别方法可能会失效。

2.2 基于不同期合闸的行波合闸于故障保护

该方法在对单相无损线路进行识别时,分别对线路中部故障和线路末端故障时的行波波头和极性关系进行了分析,并提出了识别判据关系式(3),同时认为线路末端故障时,反向初始电流行波的极性与正向电流行波的极性关系将与过渡电阻大小有关,极性可能相同也可能相反,但极性相反时大小不会相近。而线路末端故障是几乎所有合闸于故障保护面临的一个难点。文中对于线路末端故障与过渡电阻大小有关的分析尚不完善,只是定性的认为极性相反时大小不会相近,缺乏理论上严密的分析论证,从而导致实际应用中的可信度不高。

2.3 基于行波测距原理的合闸于故障保护

文中通过对单相系统和三相同期合闸操作时线路中的行波信息进行了详细的时域特征分析,并利用相模变换矩阵对三相系统进行线模解耦,从而得出了相应识别判据,因而同样具有诸多不确定性。一是初始前、反行波信息与所在母线结构和故障发生的类型与时刻相关,因而导致初始前、反行波信号具有不确定性;二是如何区分初始前、反行波信号与各类噪声干扰(如 TA、TV及测量仪器中的噪声)问题;三是判据对三相不同期合闸操作是否也同样适用有待进一

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

步论证。以上这些情况都可能造成合闸于故障保护元件(SFU)误动作。

2.4 基于频率特征的合闸于故障保护

该方法通过对合闸操作暂态过程频域特征进行分析,并对不同长度的输电线路进行自振频率仿真实验。研究表明,在给定的仿真条件下,尽管自振频率明显比工频高出很多倍,且自振主频率与线路长度近似成反比,线路越长,自振频率越低。但是,在利用自振频率分量识别合闸暂态过程时,需要考虑在不同线路长度下检测自振频率分量的可靠性。需要注意的是,随着线路长度的增加,自振主频率越来越靠近基频频率,其幅值也越来越小,为自振频率的检测增加了一定困难。其次,文中主要通过对空载合闸和三相同步合闸线路的频率特征进行了大量的分析论证,而对三相不同期合闸的问题探讨不够,因而对利用合闸操作引起的自振频率分量的分析和估计方法是否也同样适用值得进一步的探讨和研究。

3 发展前景与展望

近年来,在“西电东送、南北互供、全国联网”的指导方针下,更多的超高压远距离输电网络在国内相继投入运行,特高压电网的建设也提在议事日程上。随着电压等级的不断提高,输电距离增长,电网负荷加重,故障暂态过程中产生的暂态分量也将大大增加,持续时间也会相应变长,对传统的保护装置正确动作将产生不利影响,甚至不能正确运行。合闸于故障保护因其利用被保护线路上的行波时域和频域特征差异,其识别原理简单、故障检测快速(通常在不超过几个毫秒的时间范围内),尤其能够准确地判断出线路末端故障,具有传统的保护装置难以比拟的优势;同时,利用暂态电流高、低频成分特有的衰减差异以及小波变换在微机保护中的广泛应用,势必会在未来超高压和特高压电网中起到举足轻重的作用。

参考文献

[1] 赵京立,余 恺,陈 建.高压电网的合闸于故障保护[J].电力系统自动化,2001,21(7):67—70.

[2] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Nonunit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault—generated Noise Part 1: Signal measurement [J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 1994, 141(2): 137—140.

[3] Bo Z Q, Redfern M A, Aggarwal R K, et al Non—communication Protection of Ransmission Line Based on Genetic Evolved Neural Network[A]. Proceedings of IEE International Conference on Developments in Power System Protection[C]. University of Nottingham, 1997, 291—294.

[4] Bo Z Q. A New Non—communication Protection Technique for Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073—1078.

[5] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.

[6] 周锦丽,吕艳萍.浅谈行波保护原理[J].电气开关,2006(4),11—13.

[7] 邹贵彬,高厚磊.输电线路行波保护原理与研究现状[J].继电器,2007(2),1—6.

[8] 董杏丽,葛耀中,董新洲.行波保护中合闸到故障线路的检测方法[J].中国电机工程学报,2002,22(10):77—80.

[9] 束洪春,孙向飞,司大军.一种考虑不同期合闸的行波合闸保护新方法[J].电力系统自动化,2007,31(2):41—45.

[10] 束洪春,司大军,孙向飞. 考虑断路器非同期合闸的行波数据采集方案及保护算法[J].电网技术,2005, 29(22):80—84.

[11] 段建东,罗四倍,张保会.超高速保护中合闸于故障线路的识别方法[J].中国电机工程学报,2007,27(10):78—84.

[12] 陈皓.超高压输电线路暂态电流保护的研究[D].西安:西安交通大学,2001.

[13] 陈皓,滕福生.电力系统暂态信号频谱特征的仿真研究[J].四川大学学报:工程科学版,2002,34(1):89—92.

[14] 陈皓. 电力系统故障暂态信号的功率谱估计[J]. 电力自动化设备, 2002, (6):12—15.

(收稿日期:2009—12—05)

欢迎投稿 欢迎订阅

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

110 kV电网后备保护灵敏度改善方案

陈晓娟,刘 科,郝文斌
(成都电业局,四川 成都 610021)

摘 要:为了保证电力系统的安全稳定运行,充分发挥远后备保护的作用是非常必要的。对功能较完善的 RCS—941保护装置原理进行了详细分析,并结合系统实际运行情况给出了具体算法;针对目前 110 kV电网还有一定数量的单纯阻抗圆特性的保护装置,通过取用合理系数的方法进行计算,使其灵敏度得到较大改善。总体上,通过使用新原理的 RCS—941保护装置以及改进传统算法,能够完全解决电网远后备保护灵敏度问题。

关键词:继电保护;远后备保护;灵敏度

Abstract: In order to ensure the safe and stable operation of power system, bringing the function of remote back—up protection into full play is necessary. The principles of RCS—941 protective device are analyzed comprehensively, and the specific algorithm is given in accordance with the actual conditions. For there are still some protective devices with impedance circle characteristics in 110 kV power grid, the adaptive settings are calculated by using right coefficients, which improves the sensitivity of protective device a lot. As a whole, by using RCS—941 devices and improving the traditional algorithm, the sensitivity of remote back—up protection can be up to the needs.

Key words: relay protection; remote back—up protection; sensitivity

中图分类号:TM773 **文献标志码**:B **文章编号**:1003—6954(2010)02—0074—03

0 引 言

从电力系统发生的多起事故看,当变电站因保护装置故障或开关拒动而不能就地切除故障时,只有依靠远方后备保护动作来隔离故障,而如果远后备保护灵敏度不足,事故只有继续扩大直到在远后备的保护范围内才能被切除,此时已造成较严重的设备损失甚至危及到系统的稳定运行。可见,远后备保护的灵敏度问题对系统的安全稳定运行至关重要。而近年来国内几起变电站因 10 kV侧严重故障导致直流系统接地而使本站保护装置拒动的事例更说明远后备保护必不可少,充分发挥保护装置的远后备功能是非常必要的。

1 LFP—941保护装置原理简介

目前,110 kV电网多采用不受系统大小运行方式影响的距离保护作为本级线路相间故障的主保护以及下级变电站主变压器的后备保护。

自微机保护开始应用,前十多年成都电网 110 kV线路保护采用的基本上为 LFP—941系列高压输电线路成套保护装置,该装置采用圆特性阻抗继电器构成距离保护,如图 1,以$\angle\theta=\varphi_{lm}$($\varphi_{lm}$为距离保护的最大灵敏角,通常取为线路阻抗角),长度为 z_{zd}(距离保护的动作整定值)的线段为直径作圆,圆弧经过原点,则该圆为距离保护的阻抗动作圆,圆内为保护动作区。

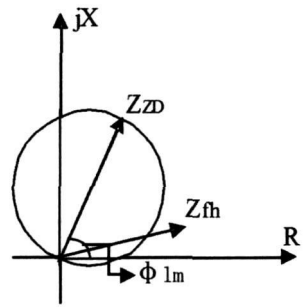

图 1 圆特性阻抗保护原理图

从图 1可知,负荷阻抗必须落在阻抗动作圆外,正常运行时保护才不会误动作,而负荷电流越大,负荷阻抗就越小,距离保护定值也将整定得越小,这就导致保护范围缩短,一些重载线路往往作不了相邻设备的后备保护,这种现象在前几年特别严重,以至于不得不采取限制负荷和停用备自投的手段。

2 RCS—941保护装置原理分析及应用

从 2004年开始,RCS—941(943)系列高压输电

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线路成套保护装置替代了 LFP－941保护装置开始在全国应用，该装置距离保护采用圆特性阻抗元件和四边形特性阻抗元件相结合共同构成保护动作元件，提取了两者的优点，既能躲过负荷阻抗，又能作相邻变压器的后备保护。但因为继保整定人员长期局限于 LFP－941保护装置的整定方法之中，且对于 RCS－941(943)保护装置的原理掌握不透彻，并不能充分地应用 RCS－941(943)保护的优点。下面对该保护的原理特性作详细分析，并给出对应于不同线路和不同类型负荷的保护整定计算方法。

RCS－941(943)线路保护根据负荷阻抗呈电阻性，而变压器、输电线路阻抗呈电抗性，利用两者的特性差异构建阻抗动作区。负荷阻抗角和线路阻抗角大小见表 1、表 2。

表 1 各种功率因数下对应的负荷阻抗角

功率因数	0.8	0.85	0.9	0.93	0.95	0.98
负荷阻抗角	36.9°	31.8°	25.8°	21.6°	18.2°	11.5°

表 2 各种型号输电线路的实测阻抗角(统计数据)

线路型号	LGJ－240	LGJ－185	LGJ－150	YJLW－400
线路阻抗角	68°～75°	69°～76°	63°～68°	66°～75°

续表 2

线路型号	YJLW－500	YJLW－630	YJLW－1 000	YJLW－400
线路阻抗角	73°～76°	75°～79°	76°～80°	65°～76°

由上表可见，负荷阻抗 Z_{fh}呈电阻性，靠近实轴；而输电线路阻抗 Z_{xl}呈电抗性，靠近纵轴；变压器阻抗角一般大于 78°，更趋近纵轴。根据它们特性的不同，于是采取限制靠近实轴的动作区域，增加靠近纵轴的动作区来实现，同时避越负荷阻抗与满足远后备要求的功能。

如图 2，以∠φ＝70°(假设输电线路阻抗角为 70°)，长度为 z_{zd}的线段 OM 为直径作圆，圆弧经过原点，此为避越负荷阻抗的动作圆(根据最大负荷电流整定)。于该圆圆周右侧作与 OM 相平行的切线确定四边形动作阻抗的右边界，切点为 A 点，上侧边界由 ON＝Z_{REC}(Z_{REC}按作相邻设备远后备保护有足够灵敏度设置)确定，同时垂直于 OM，下侧边界由切点 A 与圆心的连线确定，左侧边界为在第二象限作过原点 O 且与纵轴夹角为 15°的直线确定，四条直线相交于 A、B、C、D，这样确定四边形阻抗的四条边界。线路与变压器的测量阻抗落入此区域内。因为 AD 垂直于 OM 且均经过圆心，所以 OA 与 OM 的夹角固定为 45°

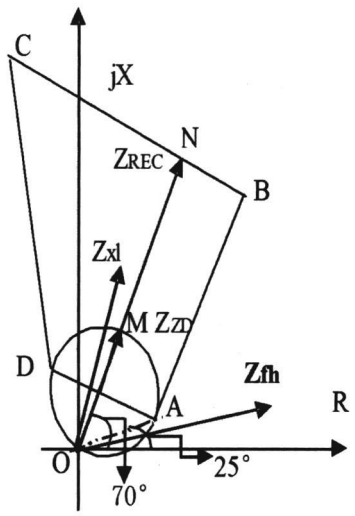

图 2 四边形结合圆特性阻抗保护原理图

由图 2可见，四边形位于纵轴附近，与实轴相距 $\frac{Z_{zd}}{2}(1-\mathrm{ctg}\varphi_{lm})$，根据 SCADA 有功无功统计数据表明，成都电网 110 kV 系统的功率因数均在 0.93以上，对应于负荷阻抗角 21.6°，而线路实测参数统计资料表明，96%以上的线路阻抗角均在 70°以上，70°－45°＝25°＞21.6°，说明对于绝大多数的输电线路，其四边形动作阻抗区与负荷阻抗无交集，无论 Z_{REC}整定为多少，在重载情况下距离保护都不会误动作，即对于任意阻抗的相邻变压器或线路，都能整定足够灵敏度的 Z_{REC}值，实现远后备保护功能。

在实际运行中，也有少部分阻抗角小于 68°的线路，如果此时又恰遇线路负荷功率因数偏小，负荷阻抗有可能落入四边形阻抗动作区内，下面进行分析。

(1)负荷阻抗 Z_{fh}落入与动作边界 AB 相交区段，以一般区域电力系统曾出现的最小阻抗角为 63°的线路距离保护为例，φ_{lm}＝63°，负荷功率因数为 0.93(即负荷阻抗角 21.6°)，则此时 OA 与实轴的夹角为 63°－45°＝18°＜21.6°，负荷阻抗落入 AB区。见图 3。

由图 3可知，Z_{zd}应满足约束条件为

$$\frac{Z_{zd}}{2}<Z_{fh.min}\sin(\varphi_{lm}-\varphi_{fh}) \qquad (1)$$

即：$Z_{zd}<2Z_{fh.min}\sin(63°-\varphi_{fh})$，这说明负荷阻抗角越大(即负荷功率因数越小)，$Z_{zd}$越小，对于功率因数为 0.95的负荷，要求 $Z_{zd}<1.41Z_{fh.min}$；对于功率因数为 0.8的负荷，要求 $Z_{zd}<0.88Z_{fh.min}$，可见 Z_{zd}受负荷功率因数的影响较大。功率因数越小，则保护区域的实部区域越短，这样将影响保护对经过渡电阻短路故障的判断。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

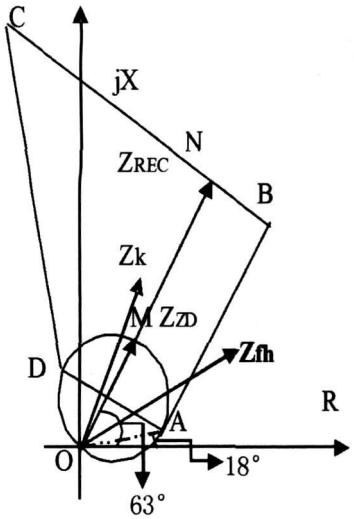

图 3 四边形结合圆特性阻抗保护原理分析图

下面分析的整定 Z_{REC},因为 Z_{fh}与 AB区段相交,必然与 BC段 (Z_{REC})无交集,所以 Z_{REC}的取值不受 Z_{fh}的影响,可以整定足够灵敏度的 Z_{REC}值,实现远后备保护功能。

(2)负荷阻抗 Z_{fh}落入与动作边界 BC相交区段,当负荷阻抗角不断增大,越来越向纵轴偏转,则负荷阻抗将与 BC区段相交,此时 Z_{REC}的取值就与 Z_{fh}有关,由图 3可知,Z_{REC}应满足约束条件为

$$Z_{REC} < Z_{fh.min}\cos(\varphi_{lm}-\varphi_{fh}) \qquad (2)$$

这说明负荷阻抗角越大,Z_{REC}可取范围越大。当然,Z_{fh}落入 BC区的条件是,φ_{fh}足够大。而 Z_{REC}越小,Z_{fh}也越易落入 BC区,取 Z_{REC}下限 Z_{zd},则此时至少 $\varphi_{fh} \geqslant \varphi_{lm} - tg^{-1}(\frac{1}{2})$,取最小的 $\varphi_{lm}=63°$,则 $\varphi_{fh} \geqslant 63° - tg^{-1}(\frac{1}{2}) = 36.4°$,对应功率因数为 $\cos 36.4° = 0.8$。对于一般 110 kV电网,即使出现特殊情况,负荷功率因数也不曾低于 0.85,所以一般 110 kV系统可不考虑负荷阻抗进入 BC区的情况。

综上所述,只要线路阻抗角在 70°以上,均可以整定足够灵敏度的 Z_{REC}值以实现远后备功能。Z_{zd}由公式 $Z_{zd}=\frac{Z_{fh.min}}{K_k K_h K_{zq}\cos(\varphi_{lm}-\varphi_{fh})}$决定;而当 $\varphi_{lm}-\varphi_{fh}<45°$时,$Z_{zd}$需满足公式 (1),此时装置对经过渡电阻短路故障的保护灵敏性变差,Z_{REC}的取值亦可以按对下级变压器有足够灵敏度整定,完成远后备功能;一般 110 kV电网不考虑负荷阻抗进入 BC区的情况。

3 电网后备保护灵敏度改善方案

目前国内 110 kV区域电网仍然有很多线路保护为单纯阻抗圆特性的保护装置,因为习惯和趋向于保守整定,继电保护整定计算人员往往将定值的可靠性整定得较高,而削弱了灵敏度,下面进行分析并给出合理化建议。

相间距离Ⅲ段保护的整定计算公式 (方向阻抗继电器)为

$$Z_{dⅢ}=\frac{Z_{fh.min}}{K_k K_h K_{zq}\cos(\varphi_{lm}-\varphi_{fh})}$$

$Z_{fh.min}$——最小负荷阻抗,

$$Z_{fh.min}=\frac{(0.9\sim0.95)U_e}{\sqrt{3}I_{fh.max}}$$

K_k——可靠系数,取 1.2~1.3;

K_h—— 继电器的返回系数;

K_{zq}——负荷的自起动系数;

U_e—— 电网的额定线电压;

$I_{fh.max}$—— 线路的最大负荷电流;

φ_{lm}—— 阻抗继电器的最大灵敏角 (等于线路阻抗角);

φ_{fh}) —— 负荷阻抗角。

对某条线路来说,U_e、φ_{lm}、φ_{fh}是确定值,K_k 可确定为 1.2,不确定的在 K_h(继电器的返回系数)和 K_{zq}(负荷的自起动系数)。继电器的返回系数与装置类型有关,常规保护装置的返回系数较大,为 1.15,微机保护装置的返回系数较小,从厂家得到 确 认 为 1.05。对于负荷自起动系数的取值,目前没有任何规程对此作规定,更未严格按照电压等级明确。在规程没有严格要求距离Ⅲ段必须保证远后备灵敏度的情况下,作为继电保护整定计算人员,通常趋向于强调可靠性,将各项系数取得较大,长期以来,继保整定人员普遍将继电器的返回系数取为 1.15,自起动系数取为 2。如果可靠系数取为 1.2,上面几项相乘的综合系数为 $K_z=K_k \cdot K_h \cdot K_{zq}=1.2\times1.15\times2=2.76$,再加上电压考虑的系数,则 $K_z=2.76/0.9=3.06$,显然偏大。然而系数取得偏大,虽然提高了可靠性,却降低了保护的灵敏性。

负荷自起动系数的取值范围较大,因此它的取值直接影响到保护的灵敏度,但目前仅仅在一些参考书中有说明。例如继保整定人员常用的参考书目文献[1]:K_{zq}按负荷性质可取 1.5~2.5(未分电压等级进行明确规定),然而同时在该书给出的算例中,却将自起动系数取为 1(330 kV电压等级);在文献[6]中

(下转第 94页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[20] Skyllas－Kazacos M, Menictas C. The Vanadium Redox Battery for Emergency Back－up applications[C]. The 19th International Telecommunications Energy Conference Melbourne Australia. 1997: 463－471.

[21] Sasaki T, Kadoya T, Enomoto K. Study on Load Frequency Control Using Redox Flow Batteries[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Denver Colorado USA, 2004: 580－586.

[22] Lone S A, Mufti M D. Integrating a Redox Flow Battery System With a wind－diesel Power System[C]. International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth－2006, New Delhi India, 2006: 1－6.

[23] 刘文毅,杨勇平,张昔国,等.压缩空气蓄能(CAES)电站及其现状和发展趋势[J].山东电力技术, 2007(2): 10－14.

[24] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J],电网技术, 2008(7): 1～9

[25] 张建成.飞轮储能及其运行控制技术的研究[D].河北保定:华北电力大学, 2000.

[26] 李雪松.飞轮储能系统电动发电运行控制技术的研究[D].河北保定:华北电力大学, 2007.

[27] Kotz R, Carlen M. Principles And applications of Electrochemical Capacitors[J]. Electrochemical Acta 2000(45): 2483.

[28] 胡毅,陈轩恕,杜砚,等.超级电容器的应用与发展[J].电力设备, 2008, 9(1): 19－22.

[29] 四川省国民经济和社会发展第十一个五年规划[Z].. 2006.

[30] 川投能源.川投能源向四川省投资集团有限责任公司发行股份购买资产之重大资产重组暨关联交易报告书[R].四川成都: 2009.

作者简介:

高希为(1984－),男,硕士研究生,主要研究方向:调度自动化与计算机管理系统。

滕 欢(1965－),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(**收稿日期**: 2010－01－26)

(上接第 76页)

对负荷自起动系数有明确规定: K_{zq}与负荷的性质和网络接线有关;对 220 kV线路,取 1;对 110 kV线路,取 1.3。实际自起动系数的取值是影响保护灵敏度的重要因素,《电网继电保护装置运行整定规程》应对之作明确规定,对于 110 kV电网采用 1.05的返回系数和 1.5的自起动系数已足够可靠。

以成都电网 110 kV蓉华线为例, 蓉华线线路阻抗 7.6 Ω,华阳站主变压器高低压侧间的阻抗为 58.9 Ω,负荷功率因数 0.9,线路阻抗角 72°。按躲过线路最大负荷 105 MVA计(I_{fh}=551 A),计算结果如表 3。

表 3 传统算法与改进算法距离阻抗计算结果

系数及定值	K_K	K_h	K_{zq}	距离Ⅲ段	K_{lm}(远后备)
传统算法	1.2	1.15	2	54.3 Ω	0.82
改进算法	1.2	1.05	1.5	79.3 Ω	1.19

可见,自起动系数和返回系数的取值不一样,距离保护的远后备灵敏度也大不一样。按照保护装置与系统实际负荷性质对距离保护进行整定,能大大提高距离保护作远后备的灵敏度,应根据装置和系统运行的实际情况取值,既保证了保护的可靠性,又尽量发挥了距离保护的远后备功能。

对于一些重载线路,即使调整了各项系数仍不能满足灵敏度要求时,应将保护装置更换为 RCS－941型保护装置为宜。

4 结 语

通过采用原理完善的 RCS－941保护装置,能够很好地实现对邻变电站后备保护作用;通过改进距离保护的整定计算方法,使电网原有的保护装置灵敏度得到提高,有利于电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等.电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M].北京:水利电力出版社, 1993.

[2] 李天华,等. 3 kV～110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007.

[3] 王梅义. 电网继电保护应用[M].北京: 中国电力出版社, 1998.

[4] RCS－941系列高压输电线路成套保护装置技术说明书[R].南瑞继保电气有限公司.

[5] LFP－941系列高压输电线路成套保护装置技术说明书[R].南瑞继保电气有限公司.

[6] 潘和勋,等.电力系统继电保护配置及整定计算[D].成都:成都科技大学.

(**收稿日期**: 2009－12－10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于 RFID的变电站巡检系统

王 越[1],麻赛军[2]
(1.成都电业局双流供电局,四川 双流 610200; 2.重庆大学自动化学院,重庆 400044)

摘 要:传统的变电站巡检方式由于其固有缺陷越来越不能满足变电站管理信息化和规范化的要求。提出了一种基于 RFID技术的变电站巡检系统。该系统采用具有 RFID读写器的 PDA作为巡检器,应用 RFID技术、GPRS无线通信技术和嵌入式数据库技术,可以方便地记录电力设备的到位情况和缺陷信息,解决了传统巡线方案中存在的人员到位困难和巡检数据不及时等问题,该巡检系统在电力巡检中有良好的推广使用价值。

关键词:RFID; PDA;巡检;变电站

Abstract: Inherent defects of traditional inspection system for substations can not meet the increasing requirements of management informationization and standardization. A patrol inspection system for substation based on RFID is presented. The system uses PDA with RFID reader as a patrol register. It can easily record the defect information and the information of the electrical equipment which are in place by using RFID technology, GPRS wireless communication technology and embedded database technology, which can solve the problems of personnel and delayed inspection data. So this system has a popularizing value in power inspection.

Key words: RFID; PDA; patrol inspection; substation
中图分类号:TM631 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)02-0077-03

变电站巡检是保障变电站顺利运行的一项重要措施,传统的以纸质为基础的人工巡检模式,难以有效监督巡检人员,导致经常出现由于巡检不到位、故障处理不及时而引发的电力事故。其具体缺点:①巡检结果信息少,效率低,无法满足电力企业信息规范化、管理现代化的要求。②变电站巡检工作要求运行人员到现场,巡检人员是否到位一直是困扰巡检管理工作的一个难题,影响了电力系统运行的安全性。③变电站巡检是一项工作时间较长的工作,一般需要在室外工作数小时,无法传递实时巡检数据,导致故障处理不及时。

因此,提出了一种基于当前先进的 RFID技术的变电站巡检方案,应用 GPRS及嵌入式数据库技术,可以方便地记录电力设备的到位情况和缺陷信息,并将巡检数据实时上传至中心服务器,有效地解决了人员到位困难和巡检数据不及时等问题,实现了变电站巡检管理的信息化和规范化。

1 RFID介绍

RFID(radio frequency identification,射频识别,俗称电子标签)是一种非接触式的自动识别技术。射频标签与传统的条形码相比具有明显优势。第一,安全性高,由于 RFID承载的是电子式信息,其数据内容可经由密码保护,使其内容不易被伪造及变造;第二,穿透性和无屏障阅读,RFID能够穿透纸张、木材和塑料等非金属或非透明的材质;第三,抗污染能力和耐久性,变电站很多设备暴露于野外,传统条形码的载体是纸张,容易受到污染,而 RFID经 PV材料封装之后具有良好抵抗性。典型的射频识别系统由射频标签、读写器和应用系统 3部分构成[1]。

RFID工作原理:读写器通过天线发送射频信号,射频标签通过感应电流获得的能量,将存储在芯片中载有变电站设备信息的加密信号发射出去,读写器接收信息并解码后提取设备信息,交由信息处理系统处理,完成预设功能和自动识别,RFID原理图如图 1所示。

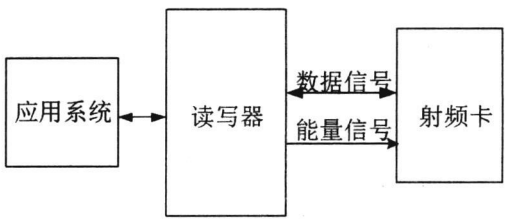

图 1 RFID工作原理

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 巡检系统总体设计及业务流程

2.1 系统总体设计

变电站巡检系统主要有数据采集系统、数据传输层、上层应用系统三大部分组成，其总体架构如图 2所示。带有 RFID读写器及 GPRS模块的 PDA(personal distal assistant掌上电脑)作为巡检器，其与中心数据库服务器之间采用 M/S(Mobile/Server)移动技术架构；上层应用系统利用电力企业局域网，采用 B/S(Browser/Server)的架构。数据传输层是联系 PDA嵌入式数据库与中心数据库服务器的纽带。

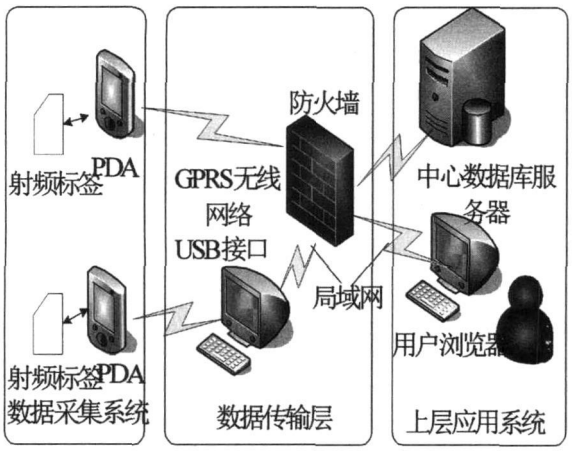

图 2 系统总体框架示意图

数据采集系统主要完成人员到位信息及变电站缺陷信息的采集，这些信息暂时存储在 PDA上的嵌入式数据中。

数据传输层主要完成 PDA与中心数据服务器之间的数据通讯，包括巡检任务内容的下达和巡检数据的实时回传等功能。数据传输方式包括 GPRS无线通信和 USB接口有线通信两种方式。在信号强的情况下，采用 GPRS可进行数据实时回传，当信号较差或无信号时，数据暂存在 PDA的嵌入式数据库看中，在信号强的地方进行回传或将 PDA带回，通过 USB接口在局域网中将数据上传至数据库服务器。

上层应用系统采用 B/S模式，局域网内部带有 IE浏览器的机子都能使用巡检系统，包括巡检任务制作、缺陷信息查询、缺陷统计及报表和到位信息查询及报表等功能。

2.2 系统业务流程

巡检系统将具有不同编号的 RFID射频标签安装在需要巡检的作业地点上。巡检人员按系统生成的巡检路线来到现场。巡检人员手持便携式数据采集器与作业地点的 RFID射频标签通信，在 PDA上即显出该区域下的对应检查设备，巡检人员可对设备进行检查，并将设备检查结果以简便的形式录入 PDA上的嵌入式数据库。通过数据同步，巡检人员将到位记录和设备缺陷记录到上传到数据库服务器，其业务流程如图 3所示。

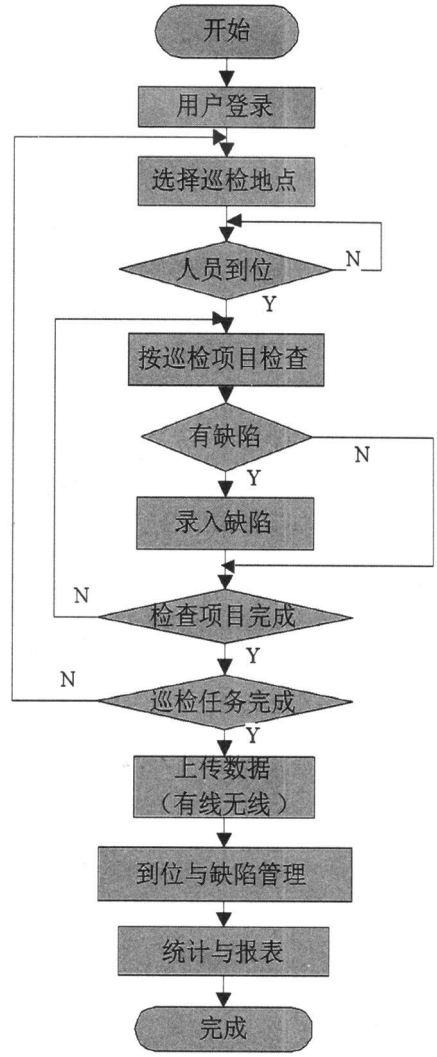

图 3 巡检业务流程图

3 巡检系统主要技术实现方法

3.1 RFID中间件

RFID中间件是介于前端读写器模块与后端数据库和应用软件之间，是 RFID应用部署的重要环节。它是 RFID运作的中枢，扮演 RFID标签和应用程序之间的中介角色，应用程序端使用中介软件提供的一组通用的 API即能连到 RFID读写器，读取 RFID标签数据。中间件使得 RFID应用系统的开发变得更

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

容易,提高了软件的可移植性,增强了系统的可维护性和可靠性[2]。

3.2 RFID操作实现

PDA操作系统选用 Windows CE平台,开发语言选用 VS2005平台下的 C#语言,通过使用.NET Compact Framework提供的强大的类库,可以快速开发应用程序。

RFID中间件提供了一组通用 API函数,C#调用这些 API函数可轻松实现对 RFID射频卡(14443A标准)的初始化、读、写、key值验证和关闭等操作。

(1)调用方法

```
[DllImport("icc_dll.dll", EntryPoint="ICC_Init", //API函数名, CharSet=CharSet.Unicode //选用 Unicode字符型, CallingConvention=CallingConvention.Winapi)]
public static extern int ICC_Init(SOCKETS Sid //Socket标识 CARD_TYPE CardType //卡片类型 ) //初始化 RF卡
```

(2)其他相关函数

```
public static extern int ICCR_Detect(int iSid) //侦测 RFID射频卡是否在有效范围内
public static extern int ICC_Close(int iSid) //关闭 RFID射频卡
public static extern int ICCRead(int iSid, int iOffset, byte[] bBuffer, ref int riCount) //读取 RFID射频卡中数据,存储在数组中
public static extern int ICCWrite(int iSid, int iOffset, byte[] bBuffer, int iCount) //将数组中的数据写入 RFID射频卡中
public static extern int ICCR_Authenticate_A(int iSid, int iBlockNum, byte[] bAuthCode) //验证 RFID射频卡某个区的 KeyA值
```

(3)操作流程:PRID操作流程如图 4所示。

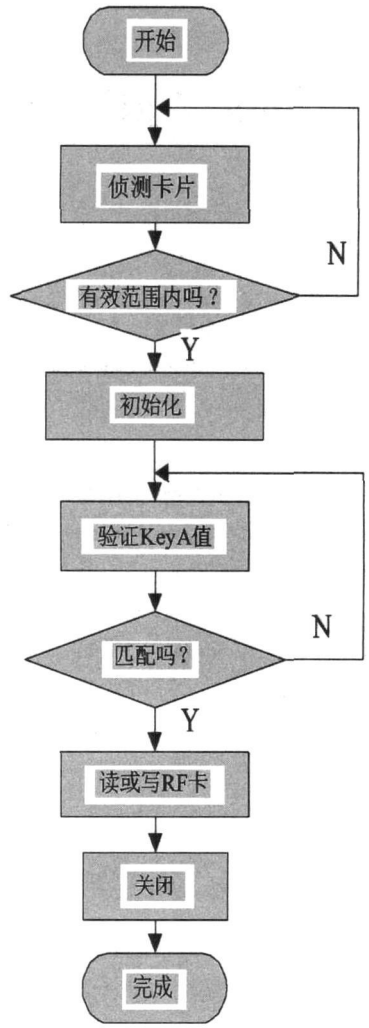

图 4 RFID操作流程图

4 结 论

巡检系统的使用,确保了变电站巡检工作的质量,提高巡检工作的效率;有效地解决了巡检不到位、漏检等情况发生;实现了变电站巡检管理的信息化、规范化和智能化,使管理人员能及时、准确、全面地了解变电站设备运行状况,便于管理层进行决策处理。

参考文献

[1] 折宏图,康厚强,陈虹.射频识别技术(RFID)在石油管道巡检中的应用[J].现代电子技术,2007,30(5):184—186,189.

[2] 成修治,李宇成.RFID中间件的结构设计[J].计算机应用,2008,28(4):1055—1057,1060.

[3] 郭传奇,王明渝.基于 GPRS通信技术的电力巡检系统设计[J].自动化仪表,2007,28(7):39—42.

[4] Bradbrook Roy,Wal—Martand RFID[J]. Folding Carton Industry,2004,31(4):30—33.

[5] 颜友宁.NET Compact Framework移动开发指南[M].北京:清华大学出版社,2006:279—300.

(收稿日期:2010—01—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于无线 ZigBee网络技术的用电需求侧全面监测

李 毅
(德阳电业局,四川 德阳 618000)

摘 要:提出了一种新型的基于无线网络技术的用电需求侧监测方案。采用 ZigBee无线技术实现低压台区组网,接入基于无线公网技术组建的 10 kV配网监控网络,实现用电需求侧的整体监测。该方案组网灵活、成本低,实践证明具备很强的实用性。

关键词: ZigBee; 10 kV配网;低压台区网;无线技术

Abstract: A novel thorough monitoring scheme of demand side is proposed based on the wireless network technologies. The low-voltage area network can be constructed by using the ZigBee wireless technology. While in respect of 10 kV distribution network, public wireless technology is used, including GPRS and CDMA networks. By this means, a completely monitoring network can be implemented by combing these two kinds of networks. The proposed scheme is able to construct the monitoring network easily and the advantages of low cost, strong feasibility and usability have been demonstrated in practice.

Key words: ZigBee; 10 kV distribution network; low-voltage area network; wireless technology

中图分类号: TP311.1 **文献标志码**: B **文章编号**: 1003-6954(2010)02-0080-03

0 引 言

近年来,由于电力供需矛盾的逐渐增大,为了保证国民生产的正常用电秩序,电力企业对 10 kV配电网络进行了大量的投资,建设了《电力负荷管理系统》、《配变监测系统》等现场数据抄收系统。从通讯技术层面上,基于 GPRS、CDMA等无线公网通讯方式在诸如配网监测等工业系统中已经得到实践的检验并普及应用[4,5],使得供电企业可以实时、准确地掌握用户现场数据并在此基础上拓展大量的上层应用。

目前台区集抄系统主要采用以下通信方式:低压载波信道、双绞线等方式有线信道、无线射频等。虽然采用有线信道方式的集抄系统非常稳定,但是这需要进行大量的布线,其工程量不亚于重新构建一个供电网络,其成本和巨大的工程量是制约有线方式发展的瓶颈;在一些地方采用的手持 PDA通过无线射频信道以及蓝牙方式与抄表器进行通信,抄收电表数据,这种方式只是解决电表抄收最后 1 m的问题,但是这种方式无疑加大了用电营销人员的工作量,在数据的实时性方面也无法满足供电企业的实际需求。

综上所述,要建立有效的用电现场服务系统必须对用电需求侧进行全面的实时数据监测。鉴于利用 GPRS、CDMA等技术建立 10 kV配电网数据传输技术已经比较成熟,问题主要集中在如何准确可靠并较低成本地监测低压台区电网相关数据。

随着科学技术的不断进步以及人们对实践应用的深入挖掘,新一代短距离无线组网传输技术恰好可以解决这个凸现已久的矛盾。其中,ZigBee技术无论在组网方式、性能以及成本等各个方面已经完全能够满足低压台区电网监测系统的实际需求。通过 ZigBee技术组建的低压台区电网数据传输网络,可以实时、有效地将台区电力监测数据集中到一起,然后通过 GPRS/CDMA组建的 10 kV配网监测网络实时传输到供电企业,从而实现整体电力需求侧的全面监测和服务。

1 ZigBee技术

ZigBee作为新一代无线通讯技术的命名,源自于蜜蜂群间沟通信息而进行的 ZigZag形状的舞蹈[1]。ZigBee是一种短距离、架构简单、低消耗功率与低传输速率的无线通讯技术。其网路架构具备 Master/Slave属性,并可达到双向通信功用。Zigbee的基础是 IEEE 802.15.4-IEEE无线个人区域网(Personal Area Network, PAN)工作组的一项标准[7]。与其他无线协议相比,ZigBee提供了低复杂性、缩减的资源要求,最重要的是它提供了一组标准的规范。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Zigbee技术主要包括以下特点：(1)数据传输速率低：只有 10 KBps到 250 KBps专注于低传输应用；(2)功耗低：在低耗电待机模式下，两节普通 5号干电池可使用 6个月到 2年，免去了充电或者频繁更换电池的麻烦；(3)成本低：因为 Zigbee数据传输速率低，协议简单，所以大大降低了成本，且 Zigbee协议免收专利费；(4)网络容量大：每个 Zigbee网络最多可支持 255个设备；(5)时延短：通常时延都在 15 ms至 30 ms之间；(6)安全：Zigbee提供了数据完整性检查和鉴别功能，加密算法采用 AES－128，同时可以灵活确定其安全属性；(7)有效范围小：有效覆盖范围 10～75 m之间，具体依据实际发射功率的大小和各种不同的应用模式而定；(8)工作频段灵活：使用的频段分别为 2.4 GHz，868 MHz(欧洲)及 915 MHz(美国)，均为免执照频段。

综上所述，通过 ZigBee技术构建的无线网络数据传输平台，可以可靠、经济、高效、方便地实现低压台区居民电表数据的无线传输。

2 解决方案

由于 10 kV配电网络以及台区居民电网结构错综复杂，采用传统的人工抄表和分片负责和不定期进行上门检查的用电检查方式，针对性不强，盲目性大。虽然每月结算后知道配网线损高，但线损高在哪里，不能有效地分析是哪些用户正在违章用电和窃电，不能有的放矢进行追查，即使花费大量精力查到了窃电户，也苦于缺乏第一时间的窃电依据，处理难度大；由于无法了解用户的实时用电信息，不能做到准确的用户实时的电费计算。然而，通过一些采用一些现代化的通信手段的监测终端，这些问题将迎刃而解，并可以方便的实现线损的实时监测与计算、监测用户窃电以及实时算费等功能。

2.1 目 标

本方案的主要实施目标是，在 10 kV配电网部分，充分利用现有的 GPRS、CDMA等成熟的无线通信技术，构建配网数据传输网络平台；在 10 kV以下低压台区电网部分，利用 ZigBee技术构建短距离台区无线数据传输网络平台，通过该台区数据传输平台，首先将数据进行集中，然后利用 10 kV配电网的配网数据传输平台，将电网相关数据实时传输到供电企业。通过这种方式满足整个电网实时线损监测、防窃电监测以及预付费准确算费等相关电力应用。

2.2 系统架构

根据电力网络特性来划分，本方案监测范围包括上层的 10 kV配网和下层的低压台区电网分两部分。10 kV配电网监测对象主要包括大用户、商业用户以及台区等用户的用电数据监测，这些用户一般用电量较大，一旦发生违规用电以及窃电行为对于供电企业损失较严重，所以供电企业必须相对实时地了解相关用电数据；而低压台区部分的监测对象主要是居民用电数据的监测，比起 10 kV配电网络的用户，这些用户数据的实时性以及监测频率相对要低一些。

针对以上用电特征，所提出的全面监测方案从网络架构上也可以规划为两部分：在电力网络的上层 10 kV配电网络部分，采用 GPRS、CDMA以及 SMS等通信方式进行数据传输以满足其数据传输信息量大、实时性高的需求；在下层低压台区部分采用 ZigBee技术组建低速、可靠的无线网络平台，并在该无线网络平台上传输相关居民用电数据，最后再将其数据集中，通过电网上层 10 kV配电网络中已有的 GPRS、CDMA以及 GSM等终端资源，将相关数据传输到供电企业。

2.3 应用系统

所有电力监测数据通过上述基于无线技术构建的通信平台可以实时传输到供电企业内，从而满足线损实时监测、防窃电监测以及实现预付费等应用服务功能。

2.3.1 线损监测

控制线损率是衡量供电企业管理水平的重要指标。供电企业应在尊重事实的基础上，强化内部管理，并利用先进科技手段，分析和排查引起线损起伏不定的各种因素，找出关键点，逐步消除，是决定线损管理工作再上新台阶的关键所在。在本解决方案中，用户可以采用自顶向下逐步排查的方式分析出造成线损异常的位置。首先，通过分析 10 kV配电网数据，在 10 kV配电网中找出存在线损异常的部分；然后分析出现异常的台区线损数据，通过分析比较历史数据可以直接找到出现异常的具体位置。

2.3.2 防窃电

长期以来，窃电行为一直存在于电力营销中，由于反窃电技术水平低、窃电方式多样化、窃电手段也不断提高等原因，如何有效地反窃电一直困扰着供电企业[2]。窃电行为严重地损坏了电力企业的利益，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

扰乱了供用电秩序。为防窃电,供电企业采取了加强人力检查,电能表计中增设防窃电措施等各种技术手段,这在一定程度上杜绝了一些窃电,但苦于缺乏第一时间的窃电依据,造成窃电行为时有发生。通过本方案,可以第一时间掌握用户的窃电数据,并通过历史数据比对,可以有效地分析出一些难以发现的窃电行为和计量故障。

2.3.3 预付费

当前,中国各电力公司客户拖欠电费、违章用电现象比较严重,已引起有关部门的高度重视。如何采用科学的管理方法和手段来解决目前存在的问题,有效降低电力公司的经营风险,保护企业合法利益,为电力事业可持续发展创造有利条件,是摆在面前迫切需要解决的问题。通过本方案的实施,可以及时分析出居民用户的实时用电费用,根据大用户的各种表计分析计算出大用户的实时用电费用,从而实现预付费功能。

3 结束语

利用 GPRS、CDMA以及 ZigBee技术等现代通信技术,组建 10 kV配电网络及低压台区电网的无线数据通信平台,实现用电需求侧的全面监测。相关电网数据通过该无线网络平台实时传输,为电力系统各种实时应用奠定基础,从而提高供电企业的现代化管理水平。

参考文献

[1] ZigBee WEB. ZigBee Protocol Specification. http://www.zigbee.org. 2006.
[2] 李晋. 防窃电技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
[3] 王士政. 电网调度自动化与配网自动化技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
[4] 钟章队. GPRS通用分组无线电业务 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
[5] 窦中兆,等. CDMA无线通信原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[6] 国家电力公司著. 国家电力公司电力网电能损耗管理规定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
[7] IEEE WEB. IEEE 802.15.4 Specification. http://www.ieee.org. 2006.

(收稿日期: 2010—01—10)

(上接第 23页)

大于文献 [7]中的结果 0.029,原因是此方法是在全网原数据、发电机模型未经任何简化时求得,仿真模型更精细,更能充分显示系统的动态本质。

4 结 论

大规模区域互联电网低频振荡分析,最重要、最困难的工作是区域间主导低频振荡模式的求解问题。四机两区域算例研究表明,低频振荡模式由系统的固有结构特性和运行方式决定,发电机模型的详细与简单不改变振荡模式的频率,励磁系统模型和负荷特性对阻尼影响较大,并且因其移相作用可能引起区域间模式个别机组的振荡相位少许改变,但本地模式模态基本不变。因此,大规模电力系统低频振荡分析可采用文中思路,先在经典二阶模型、负荷恒阻抗模型下得到区域间低频振荡模式的频率、强相关机组、模态等基本特征信息。然后,采用详细模型,在强相关机组的暂态稳定功角曲线上实施检测,获得合理真实阻尼以及时域特性。大区联网后全国系统低频振荡分析验证了该方法的有效性和准确性。

参考文献

[1] 周双喜,苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 1—8.
[2] 邓集祥,涂 进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
[3] 白洋,邓集祥. 区域电网低频振荡模式的检测方法 [J]. 四川电力技术, 2009, 32(5): 71—74.
[4] 董航, 刘涤尘, 邹江峰. 基于 prony算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97—100.
[5] 邓集祥,欧小高,姚天亮. 基于小波能量系数的主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报, 2009, (8): 141—146.
[6] P. Kundur. Power system stability and control [M]. McGraw—Hill Inc. New York, 1994.
[7] 邓集祥,贺建明,姚天亮,等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78—83.

作者简介:

姚天亮 (1979—),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行分析与稳定控制。

(收稿日期: 2010—02—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统反相序二次电流正序接入对微机保护的影响

罗永刚[1],罗建华[1],张 凯[2]
(1.四川电力职业技术学院,四川 成都 610072; 2.绵阳电业局,四川 绵阳 621000)

摘 要:着重介绍了绵阳电业局在对 110 kV变电站进行综合自动化改造、更换变压器保护时,一次系统反相序,二次电流正序接入对微机差动保护的影响。分析了原因,提出了防范措施,这对 110 kV变压器保护的运行维护、缺陷处理带来了便利。

关键词:变压器保护;更新改造;系统反相序;保护影响;防范措施

Abstract: The influence of the secondary current with positive sequence accessing in a reversed phase-sequence system on the microcomputer-based differential protection is introduced when carrying out the integrated automation transformation of a 110 kV substation of Mianyang Electric Power Bureau. The reasons are analyzed, and the preventive actions are proposed, which is convenient for the operation, maintenance and defect processing of 110 kV transformer protection.

Key words: transformer protection; renovation; reversed phase-sequence system; influence of protection; preventive action
中图分类号:TM773 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)02-0083-02

按照四川电网的统一要求,绵阳电业局对所属的变电站进行了综合自动化改造,在对某 110 kV变电站进行综合自动化改造时,其 110 kV侧一次系统进线为反相序,主变压器为 Y△-11接线。原主变压器保护为模拟继电器保护,现对原主变压器保护进行更换,差动保护更换为 NARI继保的 RCS-9671微机保护,Y△转换在微机保护装置内部通过软件实现。由于知道这个站一次系统为反相序,所以在保护更换过程中将高、低压侧的差动二次接线在保护屏处将相序再反一次,目的是为了让进入差动保护的电流为正相序。

1 带负荷试验时差动电流的出现

保护更换完后,投运进行带负荷试验,结果在主变压器带上负荷后,差动保护马上告警,差动保护的 A、B、C三相均出现与负荷电流等幅值的差动电流。

查找原因,首先对高、低压侧差动组电流的相角和幅值进行折算,幅值能抵消,输入保护装置的电流相角也与实际情况相符,装置采样正常,查看差动保护定值,各项定值均正确。但之前采用模拟继电器保护时一直运行很稳定,经分析是由于二次相序改动后出现的问题。

2 差动电流分析及防范措施

下面以 A相为例进行分析(公式均假设高、低压侧平衡系数相等)。

差动电流计算公式:$\dot{I}_{dA}=\dot{I}'_{A}+\dot{I}_{a}$

式中,$\dot{I}_{dA}$——差动保护 A相差动电流;

$\dot{I}_{a}$——低压侧 A相电流;

$\dot{I}'_{A}$——差动保护装置内部进行相角补偿后 A相电流。

首先确定低压侧差动二次电流的向量,其取自低压侧电流互感器(TA)后直接进入差动装置参与差动电流计算,与高压侧电流的关系为 $\dot{I}_{a}=-(\dot{I}_{A}-\dot{I}_{B})$。

式中,$\dot{I}_{a}$——低压侧 A相电流;

$\dot{I}_{A}$、$\dot{I}_{B}$、$\dot{I}_{C}$——分别代表高压侧 A、B、C三相电流。

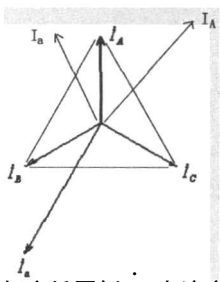

图 1 反相序低压侧 $\dot{I}_{a}$电流方向

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 1可知,在一次反相序的情况下,低压侧电流 $\dot{I}_a$ 要超前于实际高压侧电流 $\dot{I}_A$ 150°。

再分析进入差动保护装置的高压侧差动二次电流,由于差动保护装置对 Y△采取内部补偿的方式,所以进入差动保护后的高压侧 TA二次电流并不直接参与差动电流计算,而是要在差动保护经过相角补偿以后再进行差动电流计算。按照当时在保护屏处的二次接线方式,高压侧 TA二次电流 $\dot{I}_A$ 在进入保护装置时已经更换为正相序,装置内定值仍然设定的 Y△ -11接线方式,角度补偿由装置软件实现,角度补偿的公式为 $\dot{I}'_A=(\dot{I}_A-\dot{I}_B)/\sqrt{3}$。

式中, $\dot{I}'_A$——差动保护装置内部进行相角补偿后 A相电流。

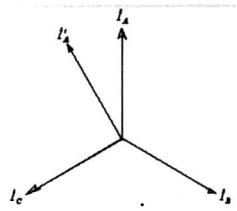

图 2 相角补偿后 $\dot{I}_A$ 电流方向

由图 2可见,经过差动保护装置相角补偿后高压侧电流 $\dot{I}'_A$ 超前于实际高压侧二次电流 $\dot{I}_A$ <30°。

差动电流计算公式: $\dot{I}_d=\dot{I}'_A+\dot{I}_a$

根据前面分析所得:低压侧电流 $\dot{I}_a$ 要超前于实际高压侧电流 $\dot{I}_A$ 150°,用于直接进行差动电流计算的高压侧电流 $\dot{I}'_A$ 超前于实际高压侧二次电流 $\dot{I}_A$ < 30°,作图如下 (图 3)。

式中, $\dot{I}_d$——差动保护 A相差动电流。

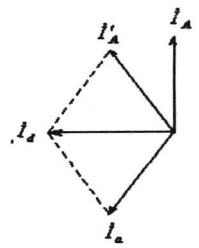

图 3 补偿后 $\dot{I}'_A$ 电流与 $\dot{I}'_a$ 电流相角差 120°

如图 3,补偿后的高压侧电流 $\dot{I}'_A$ 与低压侧电流 $\dot{I}'_a$ 相角相差 120°,这样在正常运行方式下高、低压侧差动电流向量不能相互抵消,会产生一个相当于相电流幅值大小的差动电流 $\dot{I}_d$。之后将保护屏处高、低压侧 TA二次接线恢复至反相序接入,差动电流消失,差动保护恢复正常。

同样,也可以在正相序接入方式下,将差动保护装置定值项的主变压器接线方式更改为 Y△ -1型接线,其角度同样能得到正确补偿,但这样容易造成保护人员的误判断,不建议使用。

3 结 论

电流互感器的二次接线方式对差动保护至关重要,是差动保护正确动作的前提。在对有关差动保护进行安装、改造时,应对电流互感器的二次回路进行认真检查,核实其极性、变比及回路的完好性、有无分流情况等。如需要更改差动二次回路接线,应事先进行分析,确定更改方案,切忌盲目更改;同时在进行带负荷试验时一定要认真检查,核实差动回路的差动电流分布,以确保变压器差动保护不会误动作。

(收稿日期: 2009-12-23)

德阳换流站双极站系统调试完成

2010年 3月 7日凌晨 4时,德阳换流站极Ⅱ站系统调试圆满完成,为宝德直流极Ⅱ早日全面投产奠定了基础。

德阳换流站极Ⅱ站系统调试期间,极Ⅰ处于大负荷运行状态,给本次调试工作带来了一定的难度。因此,此次调试正式开始之前,现场调试执行总指挥联系各方,详细制定极Ⅱ调试期间的安全措施,杜绝了可能影响极Ⅰ安全运行的危险。

3月 6日 8时 30分接收到国家电网调试中心调试许可指令后,四川电力试研院调试工作组人员立即投入到极Ⅱ站系统调试中。先后经过 20小时的连续工作,完成了德阳换流站不带电条件下极Ⅱ顺控操作试验和保护跳闸试验、极Ⅱ换流变带阀组充电试验、极Ⅱ OLT试验、第 3次抗干扰试验。本次站系统调试成功,为德阳换流站的系统高度和全面投产换取了时间。

转自《西南电力报》

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电力储能技术及其在四川电力系统中的应用前瞻

高希为,滕　欢
(四川大学电气信息学院,四川 成都　610065)

摘　要:电能难以储存的性质一直是困扰电力系统的主要问题之一。近几十年来,储能技术的发展作为电力系统提高稳定性、调频调压、补偿负荷的新手段,为电力系统的规划、设计、制造、控制、调度等方面带来新的发展。介绍了电力储能技术的情况和发展,结合四川电力系统的特点,进行了展望。

关键词:电力系统;储能;四川电网

Abstract: The difficulty of energy storage is one of the main problems bothering the power system. In recent decades, the development of energy storage technology is taken as a new way to improve the system stability, the control of frequency and voltage and the load compensation, which brings a development of planning, design, production, control, dispatching for power system. The situation and development of energy storage technology are introduced. According to the features of Sichuan power system, an expectation of its application is discussed.

Key words: power system; energy storage; Sichuan Power Grid

中图分类号:TM911　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003－6954(2010)02－0089－06

安全、优质,经济是对电力系统的基本要求。改革开放以来,随着中国经济建设的高速发展,电网覆盖面积不断扩大,运行控制水平不断提高,用户对于电能质量和可靠性的要求也越来越高。而中国一次能源分布与负荷密度的不协调,现有电网结构的薄弱造成装机容量难以满足峰值负荷、输电能力发展落后需求、复杂大电网暂态稳定问题日益突出;随着储能技术几十年来的不断发展,尤其是近年来的技术突破,使该技术成为继"采－发－输－配－用"外的第六大环节[1]。

1　储能系统概述

电能储存的主要形式可以按照原理分为:以动能和势能为介质的机械储能,如抽水蓄能(pumped hydro power plant)、压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)、飞轮储能(fly wheel energy storage, FWES)等;将电能直接以电磁能量的形式储存的电磁储能,如超导电磁储能(super－conducting magnetic energy storage, SMES)等;以电化学反应为基础的化学储能,如超级电容器(super capacitor energy storage, SCES)和各种蓄电池(battery energy storage system, BESS)如铅酸(lead－acid)、镍镉(Ni－Cd)、镍氢(Ni－H)、钠硫(NaS)和液流电池(redox flow batteries, RBF)等。各储能装置如表 1所示。

储能系统主要由储能元件组成的储能装置和电力电子元件组成的能量转换装置构成。储能技术涉及材料、设计、制造、工程建设、控制等多个学科和领域,储能系统主要由储能元件组成的储能装置和电力电子元件组成的能量转换装置构成。储能技术涉及

表 1　储能技术特点与应用对比

储能方式	能量调节	功率调节	响应时间	造价	维护	适应性	应　用
抽水蓄能	高	低	秒级	中	低	场地要求	调峰、调频、调相/无功、备用电源、黑启动[2－3]
压缩空气储能	高	低	分钟级	中	中	场地和燃气要求	调峰、平滑负荷、调频、分布储能、备用电源[4－5]
飞轮储能	低	高	不间断	高	低	好	调峰、调频、UPS/EPS[6－7]
超导磁储能	低	高	毫秒级	高	高	一般	系统稳定、调频、调压、提升输送能力[8－10]
超级电容器储能	中	高	毫秒级	高	低	好	平滑大功率负载、大功率直流电机启动支撑[11－14]
铅酸电池储能	低	中	不间断	低	低	好	UPS/EPS[15]
钠硫电池储能	高	较高	不间断	高	中	好	小系统稳定性、平滑负荷、UPS/EPS[17－19]
液流电池储能	高	高	不间断	高	中	好	小系统稳定性、平滑负荷、UPS/EPS[20－22]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

材料、设计、制造、工程建设、控制等多个学科和领域，现代储能系统正向着储能密度更大、转换损耗更小、运行费用更低、维护更方便、适应性更好、更安全环保的方向发展。

随着储能技术的发展和应用，电力系统中引入各种新型储能设备后，可以有效实现用户需求侧管理，削峰填谷，平滑负荷；可以促进新能源的利用，提高电力设备效率，降低供电成本；可以作为提高系统运行稳定性、调频调压、补偿负荷的一种手段。该技术的应用和进步将为电力系统的规划、设计、制造、控制、调度等方面带来新的发展。

2 电力储能技术应用现状

2.1 抽水蓄能电站

到 2005年底，全球有超过 300座抽水蓄能电站处于运行状态，其总装机容量达到 120 GW，平均年增长 9.1%。该领域发展最快、装机容量最多的国家是日本，其次是美国、意大利、德国等，部分国家的抽水蓄能机组占全国装机的比重已超过 10%[1]。

到 2005年底，全国建成投产的抽水蓄能电站共 13座，装机容量达 5 845 MW，占到总装机容量的 2.15%。预计到 2010年，中国抽水蓄能电站占全国发电装机总量的比例将提高到 2.6%左右。

2.2 压缩空气储能电站

自 1978年德国 Huntorf CAES投运以来，德国、美国、日本陆续有 MW至 GW级 CAES电站投入试运行，俄罗斯、法国、意大利、以色列、韩国等国也在进行 CAES的开发。

中国自 2003年来也投入到 CAES的研究中，目前华北电力大学正在进行压缩空气蓄能系统热力性能计算与优化及其经济性分析的研究；西安交通大学进行了冷、电、热联供的新型压缩空气储能的相关研究。哈尔滨电力部门和中石油等也有很多储气方面的研究和成果[23]。

2.3 飞轮储能

目前美国、日本、德国、英国、法国等工业强国正在大力开展 FW技术的研究与开发，并取得了很大进展，开始由实验室研究转向试运行与实际应用，并向产业化、市场化方向发展[24-26]。

中国在该领域的研究起步较晚，近几年来从事飞轮储能技术研究的有中科院电工研究所、北京飞轮储能柔性研究所以及部分高校等。目前已实现超导磁悬浮、高速电机、功率转换等领域的突破。

2.4 超导磁能存储

目前美国、日本、德国、芬兰、韩国等国都在 SMES领域实现了实际系统的初步应用，其实现功率介于 0.3～10 MVA之间，在保持电网稳定、提高输电能力和电能质量方面发挥了重要作用。

中国已先后研制成功 25 kJ～1 MJ的 SMES系统，目前中科院、中国电科院、华中科技大学、浙江大学等机构正将精力投入第二代高温超导带材钇钡铜氧涂层导体 SMES储能单元、低耗快速功率变换及其控制方法、模块化系统集成、动态建模与仿真、分布式储能系统规划及其与电网匹配运行等关键技术中，通过示范推动 SMES的实际应用。

2.5 超级电容器储能

目前国外的研究方向主要倾向于液体电解质双电层电容器和复合电极材料 /导电聚合物电化学 SC。美国、日本、德国、韩国等国都已将 SCES应用于电网之中，实现了几十 MJ数 MW级的输出[27]。

在中国，北京有色金属研究总院、解放军防化院等一批院校和公司正在开展 SC的研究。2005年，中国科学院电工所完成了用于光伏发电系统的 300 Wh/1 kW SCES。另外，有关课题组正在研究基于 SCES的分布式配网。但整体看，中国在 SC领域的研究与应用水平明显落后于世界先进水平[28]。

2.6 蓄电池储能

目前日本在钠硫电池方面处于国际领先地位，2004年全国钠硫储能总容量已超过 100 MW，美国也有 12 MW /120 MWh钠硫电池系统作为军事基地的备用电站。液流电池方面，美国、日本、欧洲等国相继将液流电池储能系统应用于风电、调峰、电能质量等用途。

自 1995年起，中国就开始了全钒液流电池的研究，已成功开发出 10 kW级储能系统，并建立了电池实验室模型；2008年，中国电科院研发了用于风电场的 100 kW级储能系统。钠硫电池方面，目前，上海电力公司正着手 50 kW /1 MW不同容量等级钠硫电池系统的研制，并将其用于 UPS/EPS，力图掌握关键技术，建立标准和规范，并实现模块化、规模化生产[24]。各种储能技术的应用对比如表 2所示。

3 四川能源布局及电力系统特点

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 电力储能技术应用对比

储能技术	典型额定功率 /MW	能量密度 /W h/kg	功率密度 /W /kg	作用时间	使用寿命 /次	综合效率
抽水蓄能	100～2 000	—	—	4～10 h	—	60% ～70%
压缩空气储能	100～300	—	—	6～20 h	—	40% ～50%
飞轮储能	0.005～5	5～50	180～1 800	15 s～15 m in	10^6	70% ～80%
超导磁储能	0.3～10	＜1	1 000	m s～15 m in	10^6	80% ～95%
超级电容器储能	—	2～5	7 000～18 000	m s～1 m in	＞10^6	＞90%
新型蓄电池储能	0.01—0.1	30～200	100～700	1 m in～20 h	10^5	70% ～80%

表 3 2005年四川一次能源构成

能源种类	生产	折标煤 /×10^4 t	消费	折标煤 /×10^4 t	构成 /%	全国构成 /%	2020规划 /%
煤炭	7 905×10^4 t	5 661	7 859×10^4 t	5 628	66.3	69.6	55
石油	14×10^4 t	20	652×10^4 t	936	11.0	21.2	22
天然气	138×10^8 m^3	1 832	90×10^8 m^3	1 195	14.1	2.7	8
化石类合计	—	7 513	—	7 759	91.3	93.4	85
水电	653×10^8 kW h	803	577×10^8 kW h	734	8.6	6.6	8
新能源	—	—	—	—	—	—	7

3.1 四川能源现状

(1)化石能源为主水电增长较快

表 3显示了 2005年四川一次能源的情况，可以看出目前四川省仍以化石能源为主。根据中国能源可持续发展体系的逐步完善，水电和新能源如光伏、风电、核电的能源份额必将大幅提高。

(2)资源丰富有待开发

截止 2005年底，四川省探明储量 1 640×10^8 m^3，其中可采天然气储量 1 011×10^8 m^3，且在不断增加中，2005年天然气开采量 138×10^8 m^3；已探明煤炭资源量 135.3×10^8 t保有资源量 120.8×10^8 t 2005年生产总能力 9 693 ×10^8 t已开发水电 2 359 MW，仅占技术可开发量的 19.6%[29]。可见四川省水电、天然气资源丰富，但在终端能源消费中所占比例仍然不高，开发潜力巨大，同时这一现状也决定了四川电力系统的发展方向。

3.2 四川电力系统现状

到 2005年底，四川省发电装机容量达到 22 455.6 MW，其中水电 14 969.6 MW，火电 7 496.0 MW；2005年底在建规模 18 700 MW，其中水电 14 100 MW、火电 4 60 MW，不含金沙江溪洛渡的 6 300 MW；外送能力达到 2 640 MW。水电从 2000年的 36 900 GW h时增长为 2005年的 65 300 GW h，平均年增长率 11.82%[29]。

由于水电比重过大而火电比重过小，导致四川电力供应呈现明显的丰、枯特性。丰水期，由于本身电力消化和输送能力有限，系统安全隐患较大，水电站被迫大量弃水；枯水期，江河来水减少，水电出力不足，火电受制于煤炭供应，难以填补水电不足的供应缺口，使得四川电网以受电为主，甚至造成高峰期部分地区拉闸限电。

为了满足丰枯互济、水火互补的需求，改善电能质量并提高电力系统的稳定性和可靠性，目前正加紧特高压交流和直流线路的建设，现已建成德宝超高压直流工程、黄万、洪板特高压交流工程等。到 2015年和 2020年，结合锦屏、溪洛渡、向家坝等电站的建设，川电外送容量将达到 12 GW 和 15 GW。逐步实现四川“大电网、大枢纽、大平台”的发展目标。

3.3 四川电力系统的需求

(1)确保系统的安全性和稳定性。

四川电网覆盖面积大，一次能源的分布与负荷分布不均匀，水电比重大造成的丰枯期特性，电煤供应不足制约火电发展，局部电网结构不完善造成输电能力、无功补偿不足，系统的安全性和稳定性受到严重挑战。

随着近年来多条 500 kV、220 kV送电线路和变电站的建设和投产，发展多点储能装置支撑的坚强电网可以有效保证系统的电压和频率，消除由于电网互联和负荷突变引起的区域振荡，实现输配电系统的动态管理和提高电网暂态稳定性，还能增强电网的抗灾能力。

(2)调整四川电力产业结构，推进节能调度

2008年 12月底，四川电网统调统分电厂 154

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个,装机容量 26 527.2 MW,其中:水电厂 120个,装机 15 611.0 MW,占 58.85%;火电厂 34个,装机 10 916.2 MW,占 41.15%[30];“十二五”期间四川将继续调整火电结构,大力发展新技术项目,如将CAES引入火电机组;对移民和生态保护条件成熟的水电项目加快开工建设;优化电源结构,合理规划布局一些运行灵活、有利于调峰或可起到电网支撑作用的电力储能项目。积极推进节能发电调度试点工作,并及时总结经验,尽快推广实施。

(3)提高对外的输送能力,解决跨区域供需矛盾

随着宝德直流工程、广元、绵阳 500 kV变电站等工程的投产,四川电网与西北电网通过德宝直流联网运行,四川电网与重庆电网通过 4回 500 kV联络线联网运行,并通过鄂渝联络线与华中主网联网运行。丰水期,四川电网将富余水电送至华中和西北地区;在枯水期,华中和西北电网向四川电网输送火电电量。这缓解了由于煤炭产量不足造成的四川缺电问题,并减轻了铁路运输的压力,但输送容量的增加仍然难以赶上快速增长的水电发电能力和输送需求。为了提升这些线路的输送能力和可靠性,除了加强输电能力的建设,还可以引入相关的储能设备,提高电能利用效率。

(4)增加供电可靠性,不断改善电能质量

在系统因事故发生重要负荷电力供应中断时,需要电力储能设备作为 UPS/EPS提供动力,减小损失,为电网恢复创造条件。

在电能质量方面,目前四川电网由于地震以及电容器质量问题造成的无功补偿不足,严重影响了电压合格率。成都电网仅能满足变压器补偿要求,无法实现分层分片就地平衡,使得成都负荷中心的电压支撑问题较为突出,需要相关设备来补偿无功、支撑电压。

(5)大力扶持新能源和可再生能源发电

四川省的生物质能源、小水电、光伏、风能、地热能等新能源储量丰富。但一些可再生能源发电具有不稳定和不连续的特点,虽然与大系统并网冲击不大,但当局部电网比例超过 10%时将需要能够快速充放电的储能设备支持。

4 储能技术在四川电力系统中的应用

图 1显示了目前各种储能技术的应用方向和技术成熟度,实际应用还需考虑成本、环境条件等多种因素,针对四川省电力系统的现实需求,计及电力系统发展战略和相关规划,通过自主创新掌握核心技术,适度引进以推动实际工程的应用。

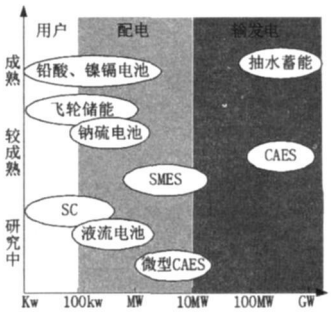

图 1 储能技术功率等级与技术成熟度

(1)以中国高温 SMES研究为重点引入分布式储能系统,提高区域电网暂态稳定性,抑制低频振荡,增加主干线路输电能力。

在即将形成的大电网互联模式下,当系统中出现较大扰动时,为了更快地相应扰动以保持系统功率的平衡和稳定,SMES的毫秒级响应速度、大功率/能量传递能力可以有效减小和吸收扰动对于电网的冲击,抑制和消除系统中的低频振荡、同步振荡和谐振,缩短暂态过渡过程,使系统迅速恢复稳定状态,提高系统的可靠性。

(2)建设 GW级抽水蓄能混合式电站和 CAES电站,满足电网调峰、备用和节能调度需要。

为了优化电源结构,保证电网安全运行,改善电能质量,提升经济和环保性,借助目前全国范围内电力供应需求趋于缓和、国内抽水蓄能电站和大型高效火电机组的建设和规划进程得到加快的良机,利用新技术和创新提高效率、增加运行灵活性,一批新的水利、水电、抽水蓄能混合电站的新建和扩建,以及根据实际条件引入 CAES的大型火电机组的改扩建将进一步促进社会经济协调发展、环境保护和资源的节约利用。

(3)以可再生能源和新能源应用为切入点,开发 100 kW/MW级液流和钠硫电池储能系统,逐步代替铅酸电池系统,平滑区域电网负荷、提高配电网供电可靠性、作为 UPS/EPS等。

由于全钒液流电池性能可靠、成本低、寿命长等优点,目前已成为液流电池体系中主要的商用开发方向。钠硫电池技术由国外垄断,目前价格较高。对于这两种电池,中国已具备一定的技术积淀,为未来自主研发大容量储能系统奠定了条件。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结 论

评述了电力储能技术的情况和发展,结合四川电力系统的特点,结论如下。

(1)高效化、能量高密度化和成本低廉化的新型电力储能技术将更有效地在电力系统中发挥调峰、电压补偿、频率调节、电能质量管理等重要作用。

(2)通过引入相关储能设备将有助于四川电网的安全性和稳定性,增强对外输电能力,提高电网可靠性和电能质量,有利于产业结构调整、节能调度和可再生能源的推广。

(3)通过增大储能技术研究的投入,增强自主创新能力,掌握储能核心技术,才能降低成本,推动储能技术的实际应用。

参考文献

[1] Ter—Gazarian A. Energy Storage for Power Systems [J]. IEE Energy Series 6.

[2] Schoenung S M, Burns C. Utility Energy Storage Applications Studies [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(3): 658—665.

[3] Lu N, Chow J H, Desrochers A A. Pumped—storage Hydro—turbine Bidding Strategies in a Competitive Electricity Market[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Toronto Ontario Canada, 2003.

[4] Swider D J. Compressed Air Energy Storage in an Electricity System with Significant Wind Power Generation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 95—102.

[5] Lee S S, Kim Y M, Park J K, et al. Compressed Air Energy Storage Units for Power Generation and DSM in Korea [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Tampa, USA, 2007.

[6] Kim W H, Kim J S, Raek J W, Ryoo H J, Rim G H. Improving Efficiency of Flywheel Energy Storage System with a New System configuration[C]. Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Volume 1: 24—28.

[7] Zanei G, Cevenini E, Ruff H, Ulibas O. Integrated sySTems for UPS: New Solutions in the Power Quality Chain [C]. Telecommunications Energy Conference. INTELEC 2007: 582—586

[8] Taguchi A, Imayoshi T, Nagafuchi T, et al. A Study of SMES Control Logic for Power System Stabilization [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2343—2346.

[9] Kamolyabutra D, Mitani Y, Tsuji K. Power System Stabilizing Control and Current Limiting by a SMES with a Series Phase Compensator [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2001, 14(1): 1753—1756.

[10] Dechanupaprittha S, Hongesombut K, Watanabe M, et al. Stabilization of Tie—line Power Flow by Robust SMES Controller for Interconnected Power System with Wind Farms [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2365—2368.

[11] Ribeiro P F, Johnson B K, et al. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1744—1756.

[12] 张慧妍, 韦统振, 齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术, 2006(8): 92—95.

[13] Rufer A, Hotellier D, Barrade P. A Supercapacitor—based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks[J]. Power Delivery IEEE transactions, 2004, 19(2): 629—636.

[14] Spath H, Becker K P. Short—time Backup—power for Mains—fed—links by Double Layer Capacitors [C]. IEEE 35th power electronics specialists conference, 2004, 4(4): 2475—2481.

[15] Yan J, Oti K, Yamamura N, et al. A Study on Electric Power Smoothing System for Lead—acid Battery of Stand—alone Natural Energy Power System Using EDLC[C]. Power Conversion Conference, Nagoya, 2007: 236—242.

[16] Suzuki I, Shizuki T, Nishiyama K. High Power and Long; Lfe Lithium—ion Battery for Backup Power Sources[C]. The 25th International Telecommunications Energy Conference, Brazil, 2003: 317—322.

[17] Kamibayashi M, Nichols D K, Oshima T. Development Update of the NAS Battery[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002: 1664—1668.

[18] Hawkins J M, Robbins T P. A Field Trial of a Vanadium Energy Storage System [C]. The 23th International Telecommunications Energy Conference, Edinburgh, Scotland, 2001: 652—656.

[19] Ohtaka T, Iwamoto S. Possibility of Using NAS Battery Systems for Dynamic Control of Line Overloads [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002: 44—49.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[20] Skyllas－Kazacos M, Menictas C. The Vanadium Redox Battery for Emergency Back－up applications[C]. The 19th International Telecommunications Energy Conference Melbourne Australia. 1997: 463－471.

[21] Sasaki T, Kadoya T, Enomoto K. Study on Load Frequency Control Using Redox Flow Batteries[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Denver Colorado USA, 2004: 580－586.

[22] Lone S A, Mufti M D. Integrating a Redox Flow Battery System With a wind－diesel Power System[C]. International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth－2006, New Delhi India, 2006: 1－6.

[23] 刘文毅,杨勇平,张昔国,等.压缩空气蓄能(CAES)电站及其现状和发展趋势[J].山东电力技术, 2007(2): 10－14.

[24] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J],电网技术, 2008(7): 1～9

[25] 张建成.飞轮储能及其运行控制技术的研究[D].河北保定:华北电力大学, 2000.

[26] 李雪松.飞轮储能系统电动发电运行控制技术的研究[D].河北保定:华北电力大学, 2007.

[27] Kotz R, Carlen M. Principles And applications of Electrochemical Capacitors[J]. Electrochemical Acta 2000(45): 2483.

[28] 胡毅,陈轩恕,杜砚,等.超级电容器的应用与发展[J].电力设备, 2008, 9(1): 19－22.

[29] 四川省国民经济和社会发展第十一个五年规划[Z].. 2006.

[30] 川投能源.川投能源向四川省投资集团有限责任公司发行股份购买资产之重大资产重组暨关联交易报告书[R].四川成都: 2009.

作者简介:

高希为(1984－),男,硕士研究生,主要研究方向:调度自动化与计算机管理系统。

滕 欢(1965－),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(**收稿日期**: 2010－01－26)

(上接第 76页)

对负荷自起动系数有明确规定: K_{zq}与负荷的性质和网络接线有关;对 220 kV线路,取 1;对 110 kV线路,取 1.3。实际自起动系数的取值是影响保护灵敏度的重要因素,《电网继电保护装置运行整定规程》应对之作明确规定,对于 110 kV电网采用 1.05的返回系数和 1.5的自起动系数已足够可靠。

以成都电网 110 kV蓉华线为例, 蓉华线线路阻抗 7.6 Ω,华阳站主变压器高低压侧间的阻抗为 58.9 Ω,负荷功率因数 0.9,线路阻抗角 72°。按躲过线路最大负荷 105 MVA计(I_{fh}=551 A),计算结果如表 3。

表 3 传统算法与改进算法距离阻抗计算结果

系数及定值	K_K	K_h	K_{zq}	距离Ⅲ段	K_{lm}(远后备)
传统算法	1.2	1.15	2	54.3 Ω	0.82
改进算法	1.2	1.05	1.5	79.3 Ω	1.19

可见,自起动系数和返回系数的取值不一样,距离保护的远后备灵敏度也大不一样。按照保护装置与系统实际负荷性质对距离保护进行整定,能大大提高距离保护作远后备的灵敏度,应根据装置和系统运行的实际情况取值,既保证了保护的可靠性,又尽量发挥了距离保护的远后备功能。

对于一些重载线路,即使调整了各项系数仍不能满足灵敏度要求时,应将保护装置更换为 RCS－941型保护装置为宜。

4 结 语

通过采用原理完善的 RCS－941保护装置,能够很好地实现对邻变电站后备保护作用;通过改进距离保护的整定计算方法,使电网原有的保护装置灵敏度得到提高,有利于电网的安全稳定运行。

参考文献

[1] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等.电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M].北京:水利电力出版社, 1993.

[2] 李天华,等. 3 kV～110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007.

[3] 王梅义. 电网继电保护应用[M].北京: 中国电力出版社, 1998.

[4] RCS－941系列高压输电线路成套保护装置技术说明书[R].南瑞继保电气有限公司.

[5] LFP－941系列高压输电线路成套保护装置技术说明书[R].南瑞继保电气有限公司.

[6] 潘和勋,等.电力系统继电保护配置及整定计算[D].成都:成都科技大学.

(**收稿日期**: 2009－12－10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net